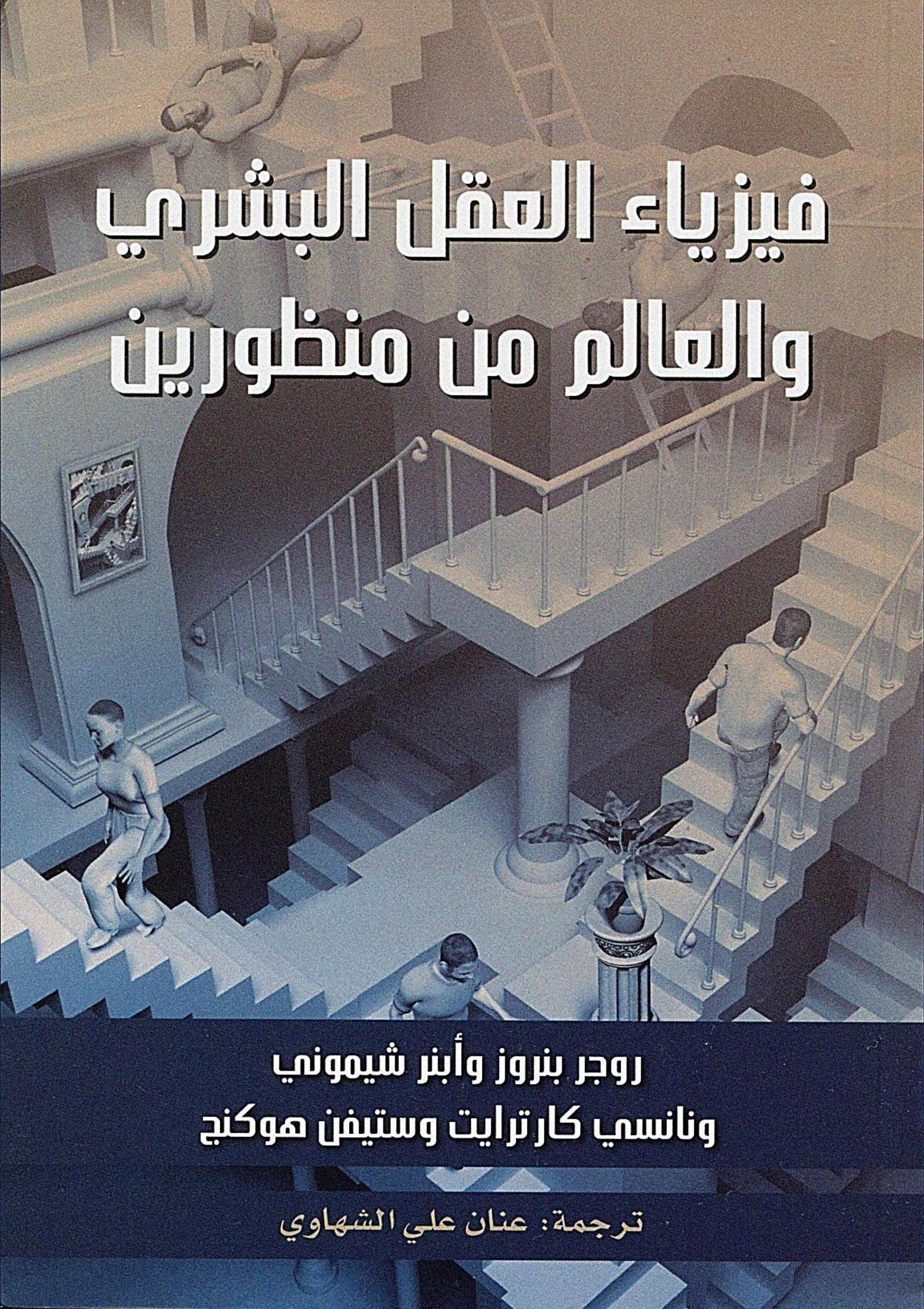


فيزياء العقل البشري والعالم من منظورين

روجر بنروز وأبنر شيموني
ونانسي كارترايت وستيفن هوكنج

ترجمة: عنان علي الشهاوي

لمحة عن المؤلفين:

روجر بنروز: أستاذ كرسي الرياضيات بجامعة أوكسفورد.

أبنر شيموني: أستاذ شرف الفلسفة والفيزياء بجامعة بوسطن.

نانسي كارترايت: أستاذ الفلسفة والمنطق والمنهج العلمي في جامعة لندن للعلوم الاقتصادية والسياسية.

ستيفن هوكنج: أستاذ الرياضيات بجامعة كامبريدج.

فيزياء العقل البشري والعالم
من منظورين

فيزياء العقل البشري والعالم
من منظورين

تأليف: روجر بنروز
بالتعاون مع
أبنر شيموني ونانسي كارترايت وستيفن هوكنج
تحرير: مالكوم لونجير

ترجمة: عنان علي الشهاوي
مراجعة: إيمان عبد الغني عبد الصمد

كلمات عربية
كلمة
KALIMA

The Large, the Small and the Human Mind

فيزياء العقل البشري والعالم من منظورين

Roger Penrose with Abner Shimony, Nancy Cartwright, and Stephen Hawking

روجر بنروز بالتعاون مع أبنر شيموني ونانسي كارترايت وستيفن هوكنج

الطبعة الأولى ١٤٣٠هـ-٢٠٠٩م
ISBN 978 977 6263 24 6

كلمة
إن هيئة أبو ظبي للثقافة والتراث (كلمة) غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره
وإنما يعبّر الكتاب عن آراء مؤلفه
ص.ب. ٢٣٨٠ أبوظبي، الإمارات العربية المتحدة
هاتف: ٦٣١٤٤٦٨ ٢ ٩٧١+ **فاكس:** ٦٣١٤٤٦٢ ٢ ٩٧١+
الموقع على شبكة الإنترنت: www.kalima.ae
البريد الإليكتروني: info@kalima.ae

كلمات عربية للترجمة والنشر
إن كلمات عربية للترجمة والنشر غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره
وإنما يعبّر الكتاب عن آراء مؤلفه
٤٣ شارع ابن قتيبة، حي الزهور، مدينة نصر، القاهرة ١١٤٧١
جمهورية مصر العربية
تليفون: ٢٢٧٢٧٤٣١ ٢٠٢+ **فاكس:** ٢٢٧٠٦٣٥١ ٢٠٢+
البريد الإليكتروني: kalematarabia@kalematarabia.com
الموقع الإليكتروني: http://www.kalematarabia.com

بنروز، روجر
فيزياء العقل البشري والعالم من منظورين / روجر بنروز بالتعاون مع أبنر شيموني ونانسي كارترايت وستيفن هوكنج . - القاهرة : كلمات عربية للترجمة والنشر، ٢٠٠٩
٢٣٢ص، ١٤٫٥×٢١٫٠سم
تدمك: ٦ ٢٤ ٦٢٦٣ ٩٧٧ ٩٧٨
١- الفيزياء - فلسفة
أ- بنروز، روجر (مؤلف مشارك)
ب- العنوان
٥٣٠٫١

المحتويات

تمهيد بقلم مالكوم لونجير	٩
مقدمة هذه الطبعة	١٧
١- الزمكان وعلم الكون	٢١
٢- ألغاز فيزياء الكم	٦٩
٣- الفيـزياء والعقـل	١١٣
٤- العقليـة وميكانيكا الكـم وتحقيق الاحتمـالات	١٦٥
٥- لماذا الفيزياء؟	١٨٣
٦- اعتراضات صريحة لعالم اختزال جريء	١٩١
٧- رد روجـر بنـروز	١٩٥
الملحق الأول	٢٠٩
الملحق الثاني	٢١٧
مصادر الصور	٢٢٥

مؤلف وكتاب

تُعد أفكار روجر بنروز Roger Penrose الأصلية والمثيرة حول فيزياء الكون واسعة النطاق والعالم ضيق النطاق لفيزياء الكم وفيزياء العقل موضوعًا خصبًا للجدل والنقاش. وقد استعرض هذه الأفكار في كتابيه اللذين حظيا بأعلى نسبة مبيعات The Emperor's New Mind أو العقل الجديد للإمبراطور وShadows of the Mind أو ظلال العقل. وفي كتابنا هذا، يلخص روجر ويطرح أحدث أفكاره في هذه المجالات المعقدة. فهو يقدم ملخصًا بارعًا لتلك المجالات في الفيزياء التي يشعر بأنها تنطوي على موضوعات أساسية لم يُبت فيها إلى الآن. ومن هذا المنطلق، يعرض روجر مفاهيم جديدة راديكالية يعتقد أنها مثمرة لفهم طريقة عمل المخ وطبيعة العقل البشري. والواقع أن أفكاره هذه قوبلت بالنقد والمعارضة على يد ثلاثة خبراء بارزين أتوا من خلفيات ثقافية متباينة، وهؤلاء الخبراء هم أبنر شيموني Abner Shimony ونانسي كارترايت Nancy Cartwright بوصفهما فيلسوفين للعلوم وستيفن هوكنج Stephen Hawking كعالم كوني وعالم في الفيزياء النظرية. وفي خاتمة الكتاب، يرد روجر على انتقاداتهم الفكرية المثيرة.

يعرض لنا هذا الكتاب مقدمة بارعة لرؤية روجر بنروز عن الفيزياء النظرية في القرن الحادي والعشرين. وخلال هذا العرض الرائع لمشكلات الفيزياء الحديثة، تسطع حماسته وبصيرته وقدرته الفائقة على العطاء.

يشغل روجر بنروز منصب أستاذ كرسي الرياضيات بجامعة أوكسفورد.

تمهيد بقلم مالكوم لونجير

من أفضل التطورات في العقد الماضي وأكثرها دعمًا صدور عدد من الكتب على يد علماء بارزين حاولوا عن طريقها توصيل جوهر العلوم وإثارتها إلى القارئ العادي. ومن بين الأمثلة اللافتة للنظر النجاح الفائق لكتاب ستيفن هوكنج «تاريخ موجز للزمان» A Brief History of Time الذي يسرد حقيقة التاريخ، وكتاب جيمس جليك James Gleick «الفوضى» Chaos الذي يبين كيف يمكن أن تتحول بنجاح مادة صعبة بطبيعتها إلى قصة بوليسية مثيرة، وكتاب ستيفن وينبرج Steven Weinberg أحلام النظرية النهائية Dreams of a Final theory الذي يجعل طبيعة فيزياء الجسيمات المعاصرة وأهدافها سلسة ومتاحة بطريقة ملحوظة.

وضمن هذه الحركة التأليفية من الشيوع والانتشار يبرز كتاب روجر بنروز The Emperor's New Mind الصادر عام ١٩٨٩ ككتاب مميز ومختلف عن غيره. وفي حين استهدف المؤلفون الآخرون نقل محتوى العلم المعاصر وإثارته، جاء كتاب بنروز كرؤية أصيلة ولافتة للنظر عن كيف يمكن تصنيف عدد من الأوجه العديدة المنفصلة للفيزياء والرياضيات والبيولوجي وعلم دراسة أعصاب المخ، وحتى الفلسفة، في إطار نظرية جديدة — ولكنها لم تتحدد بعد — للعمليات الأساسية. ولم يكن أمرًا مفاجئًا أن يثير كتاب The Emperor's New Mind قدرًا كبيرًا من النقاش، وعام ١٩٩٤ أصدر روجر كتابًا ثانيًا تحت اسم Shadows of the Mind، حاول من خلاله أن يفند عددًا من الانتقادات التي وُجهت لمجادلاته، وقدم فيه وجهات نظر

أخرى وتطورات لأفكاره. وفي سلسلة محاضرات تانر Tanner التي ألقاها عام ١٩٩٥، قدم روجر بنروز عرضًا للموضوعات الرئيسية التي ناقشها في كتابيه، ثم شارك أبنر شيموني ونانسي كارترايت وستيفن هوكنج في مناقشتها. وأعيد شرح المحاضرات الثلاث في هذا الكتاب في الفصول من الأول للثالث لتزويده بمقدمة سلسة للأفكار المشروحة باستفاضة في الكتابين. وتبرز إسهامات المناقشين الثلاثة في الفصول من الرابع إلى السادس كثيرًا من المناقشات التي عبروا عنها، وأتيحت الفرصة لروجر للتعليق على ما أثاروه في الفصل السابع.

تتحدث الفصول التي ناقش فيها روجر هذه الموضوعات ببلاغة عن نفسها، بيد أن المقدمة فقط بوسعها أن تمهد الطريق للمنهج الذي اتخذه لمعالجة بعض المسائل الأكثر عمقًا في العلم الحديث. وبناءً على ذلك، اعْتُرِفَ به دوليًّا باعتباره واحدًا من أكثر الموهوبين في مجال الرياضيات المعاصرة إلا أن أعماله البحثية تُوضع دائمًا وبحزم في إطار فيزيائي بحت. والبحث الذي نال به الشهرة الأكبر في الفيزياء الفلكية وعلم الكون يتعلق بقضايا نظريات نسبية الجاذبية، وبعض هذه الأبحاث أُجريت بالتعاون مع ستيفن هوكنج. وتوضح إحدى هذه القضايا أنه طبقًا لنظريات النسبية الكلاسيكية عن الجاذبية، من المحتم وجود مفردية فيزيائية singularity في أي ثقب أسود؛ والمفردية الفيزيائية هي منطقة في الفراغ يكون فيها انحناء المكان أو كثافة المادة — على حدٍّ سواء — كبيرة إلى ما لانهاية. وتنص القضية الثانية على أنه، طبقًا لنظريات النسبية الكلاسيكية عن الجاذبية، توجد حتمًا مفردية فيزيائية مماثلة في أصل النماذج الكونية للانفجار الكبير. وتشير هاتان النتيجتان — إلى حدٍّ ما — إلى أن هذه النظريات غير مكتملة على نحو خطير، نظرًا لأنه يجب تجنب المفرديات الفيزيائية في كل النظريات الفيزيائية ذات الدلالة.

على النقيض من ذلك، فإن هذا وجه واحد فقط لنطاق هائل من الإسهامات في مجالات متباينة متعددة للرياضيات والفيزياء الرياضية. وبذلك فإن إسهام بنروز ما هو إلا وسيلة يمكن للجسيمات من خلالها

استخلاص طاقة من الطاقة الدورانية للثقوب السوداء الدوارة. وتُستخدم أشكال بنروز التخطيطية لدراسة سلوك المادة بجوار الثقوب السوداء. وفي الواقع، ينطوي منهجه ضمنيًّا على إدراك هندسي تصويري بالغ القوة مقدَّم في هذا الكتاب في الفصول من الأول للثالث. والجدير بالذكر أن الجمهور بصفةٍ عامة اعتاد بصورة كبيرة على هذا الجانب من عمله من خلال الصور «المستحيلة» التي اتخذها عن إم سي إيشر M. C. Escher ومن خلال تبليط بنروز[1] Penrose tilling. ومن المثير للاهتمام أن الورقة الخاصة بروجر وأبيه إل إس بنروز L. S. Penrose هي التي ألهمت إيشر في تقديم عدد من الرسومات «المستحيلة». علاوةً على ذلك، استخدمت صور إيشر لحد الدائرة Circle Limit لتفسير تعصب روجر للهندسة المطلقة (اللاإقليدية) في الفصل الأول. والمعروف أن تبليط بنروز ما هو إلا إنشاءات هندسية مميزة يمكن عن طريقها تغطية سطح أفقي لانهائي على الإطلاق بعدد صغير من حجارة التبليط ذات الأشكال المختلفة. وأكثر أمثلة حجارة التبليط هذه إثارةً للدهشة تلك التي يمكنها أن تغطي سطحًا أفقيًّا لانهائيًّا دون تكرار نفسها، وبعبارةٍ أخرى، لا يتكرر نموذج حجارة التبليط نفسه مرةً أخرى عند أية نقطة على السطح الأفقي اللانهائي. وفي واقع الأمر، سيرد ذكر هذا الموضوع في الفصل الثالث من هذا الكتاب عند التحدث بخصوص ما إذا كان من الممكن تنفيذ فئات محددة من الإجراءات الرياضية باستخدام الكمبيوتر.

وهكذا يسلح روجر نفسه في مناقشاته بمجموعة هائلة من الأسلحة الرياضية، فضلًا عن نطاق واسع من الإنجازات في علمي الرياضيات والفيزياء ليستعين بكل ذلك في عرض أكثر قضايا الفيزياء الحديثة عمقًا. وبالفعل، ليس هناك مجالٌ للشك في واقعية القضايا التي يطرحها للمناقشة وأهميتها. وفي حقيقة الأمر يملك علماء الكون أسبابًا جيدة لاقتناعهم الجازم بأن الانفجار الكبير قدم لنا أكثر الصور المتاحة أمامنا إقناعًا من أجل فهم

---

[1] هو تبليط ينتج عن تكرار لا دوري لشكل هندسي اخترعه روجر بنروز عام ١٩٧٠.

السمات واسعة النطاق للكون. ومع ذلك فإن فكرة الانفجار الكبير تنقصها بعض الحقائق بدرجة خطيرة في عدد من الجوانب. ومعظم علماء الكون مقتنعون بأننا نملك فهمًا جيدًا للفيزياء الأساسية اللازمة لتفسير الخصائص الإجمالية للكون منذ أن كان عمره جزءًا من ألف من الثانية حتى اليوم. ويمكن أن يصبح هذا التصور صائبًا فقط إذا رتبنا الحالات الأولية بمزيد من الحذر. وتكمن المشكلة الكبرى في أننا قد توقفنا عن الاستعانة بالفيزياء التجريبية المختبرة منذ أن كان عمر الكون أقل من جزء من ألف من الثانية بطريقة واضحة. وبالتالي، نضطر للاعتماد على عمليات استقراء عقلانية لقوانين الفيزياء المعروفة. ومما لا شك فيه أننا نعرف جيدًا ماهية هذه الحالات الأولية، لكن كيف نشأت هذا أمرٌ لا يزال يخضع للتفكير التأملي. وثمة اتفاق عام على أن ذلك يُعد من بين أهم قضايا الكون المعاصر.

لقد طُوِّرَ إطار قياسي لمحاولة إيجاد حل لهذه المشاكل، يُعرف باسم الصورة التضخمية للكون المبكر. وحتى في هذه الصورة، من المفترض أن تكون هناك سمات معينة قد نشأت في الأزمان التاريخية المبكرة جدًّا، في أثناء ما يُعرف باسم عصر بلانك Planck epoch، الأمر الذي يفرض ضرورة فهم الجاذبية الكمية quantum gravity. وقد كان هذا العصر حين كان عمر الكون 10^{-43} ثانية فقط تقريبًا. ومع أن ذلك قد حدث منذ زمن سحيق، فإننا على أساس ما نعرفه اليوم، ينبغي أن نتعامل بجدية مع ما حدث في هذه العصور البعيدة.

وفي واقع الأمر، نجد أن روجر يتفق في أفكاره مع الصورة التقليدية للانفجار الكبير في أشياء عديدة، لكنه يرفض الصورة التضخمية في مراحلها المبكرة. وعلى العكس من ذلك، فإنه يعتقد أن هناك قدرًا مفقودًا من الفيزياء ينبغي أن يكون متعلقًا بالنظرية الكمية للجاذبية، التي هي نظرية لا نملكها حتى الآن، مع أن واضعي النظريات حاولوا كثيرًا إيجاد حل لتلك المشكلة على مدار عدة سنوات. ويطرح روجر للنقاش أنهم حاولوا حل المسألة الخطأ. ويتعلق جزء من اهتماماته بمسألة القصور الحراري للكون (أو إنتروبيا الكون entropy) ككل، ونظرًا لأن القصور الحراري — أو ببساطة

الاضطراب — يزداد بمرور الوقت، فإن الكون لا بد وأن يكون قد بدأ بدرجة عالية من التنظيم المشتمل على قصور حراري قليل للغاية. ويُعد احتمال حدوث ذلك بالمصادفة احتمالًا صغيرًا على نحو متضائل. ويجادل روجر بأنه يتعين حل هذه المشكلة كجزء من النظرية الصحيحة للجاذبية الكمية.

تؤدي ضرورة التفسير الكمي إلى نقاشات روجر المطروحة في الفصل الثاني من الكتاب بخصوص قضايا الفيزياء الكمية. وفي حقيقة الأمر، أثبتت ميكانيكا الكم — جنبًا إلى جنب مع امتدادها النسبي في نظرية المجال الكمي — نجاحها في تفسير نتائج تجريبية عديدة في فيزياء الجسيمات وفي خواص الذرات والجسيمات. واقتضى الأمر مع هذا عدة سنوات، لتقدير الأهمية الفيزيائية الكاملة للنظرية. وكما يشرح روجر بأسلوبه البديع، تحتوي النظرية كجزء من تركيبها الداخلي على ملامح غير حدسية بدرجة عالية، لا يوجد لها نظير في الفيزياء الكلاسيكية. على سبيل المثال، تعني ظاهرة اللاموضعية non-locality أنه عندما يُنتج زوج من الجسيمات أحدهما مادي والآخر مضاد للمادة، فإن كل جسيم يحتفظ بذاكرة لعملية الخلق؛ بمعنى أنه لا يمكن اعتبارهما مستقلين بالكامل أحدهما عن الآخر. ويعبر روجر عن ذلك قائلًا: «تُعتبر العلاقات الكمية شيئًا بالغ الغرابة، حيث إنها تكون في موضع ما بين جسمين جرى الفصل بينهما ولا يزال كل منهما على صلة بالآخر». كما تتيح لنا ميكانيكا الكم الحصول على معلومات عن عمليات يمكن أن تحدث لكنها لم تحدث. وأكثر الأمثلة اللافتة للنظر التي طرحها روجر للنقاش تمثل في قضية اختبار القنابل لكل من إليتزار Elitzur وفيدمان Vaidman التي تفسر كيف تختلف ميكانيكا الكم عن الفيزياء الكلاسيكية.

تُعتبر هذه الملامح غير الحدسية جزءًا من تركيب الفيزياء الكمية بيد أن ثمة قضايا أكثر عمقًا. وتلك التي يسلط عليها روجر الضوء تتعلق بالطريقة التي نربط بها بين الظواهر التي تحدث. عند المستوى الكمي بالمستوى الماكروسكوبي الخاص بإبداء الملاحظات عن إحدى المنظومات الكمية. وفي

واقع الأمر، يُعد هذا المجال موضع جدل كبير، إذ يستخدم معظم ممارسي الفيزياء قواعد ميكانيكا الكم ببساطة كأدوات حسابية يتصادف إعطاؤها إجابات دقيقة لحد فائق. فإذا طبقنا القواعد على نحو صحيح سوف نحصل على الإجابات الصحيحة. وهذا يتضمن، مع ذلك، توظيف عملية عقلانية بعض الشيء لترجمة الظواهر من العالم الخطي البسيط عند المستوى الكمي إلى عالم التجربة الحقيقية. وتتضمن هذه العملية ما يُعرف باسم «انهيار الدالة الموجية» أو «اختزال متجه الحالة». ويعتقد روجر أن بعض الأجزاء الأساسية للفيزياء مفقودة من الصورة التقليدية لميكانيكا الكم. ويطرح للجدال أن ثمة حاجة إلى نظرية جديدة بالكامل تدمج ما يسميه بـ«الاختزال الموضوعي للدالة الموجية» كجزء مكمّل للنظرية. وهذه النظرية الجديدة لا بد أن تُختزل إلى ميكانيكا كم تقليدية ونظرية مجال كمي إلى الحد المناسب، لكن من المحتمل أن تجلب معها ظواهر فيزيائية جديدة. وفيها قد تكمن حلول لمسألة الجاذبية الكمية وفيزياء الكون المبكر.

في الفصل الثالث، يسعى روجر إلى كشف النقاب عن ملامح مشتركة بين الرياضيات والفيزياء والعقل البشري. وغالبًا ما يكون من المثير للدهشة أنه لا يمكن برمجة أكثر العلوم المنطقية دقةً — وهو علم الرياضيات النظرية — على كمبيوتر ديجيتال، بصرف النظر عن مدى دقة هذا الكمبيوتر وسعة ذاكرته. فأي كمبيوتر من هذا النوع لا يستطيع التوصل إلى القضايا الرياضية بالطريقة نفسها التي يوظفها الرياضيون من بني البشر للهدف نفسه. وهذه النتيجة المثيرة للدهشة مشتقة من أحد الأشكال المختلفة لفرضية جودل Gödel's theorem. ويفسر روجر هذا بأن عمليات التفكير الرياضي — وبالمثل كل أنواع التفكير والسلوك الواعي — تُنَفَّذ عن طريق وسائل غير حسابية. وهذا مفتاح لغز بالغ الفائدة لأن حدسنا يقول لنا إن التنوع الهائل في مداركنا الواعية هو أيضًا غير حسابي. وبسبب الأهمية الشديدة لهذه النتيجة في مجادلاته العامة، خصص روجر أكثر من نصف كتابه Shadows of the Mind لتوضيح أن تفسيره لفرضية جودل تفسير جامع مانع.

تكمن رؤية روجر، إلى حدٍّ ما، في أن قضايا ميكانيكا الكم ومسائل فهم الوعي ترتبطان إحداهما بالأخرى بطرق عدة. وذلك، حيث تقترح ظاهرة اللاموضعية والترابط الكمي، نظريًّا، أساليب يمكن أن تعمل من خلالها المجالات الكبيرة للمخ بترابط منطقي. ويعتقد روجر أن الأوجه غير الحسابية للوعي قد تكون مرتبطة بالعمليات غير الحسابية التي قد تكون متضمَّنة في الاختزال الموضوعي للدالة الموجية إلى ملاحظات ماكروسكوبية. وبسبب عدم اقتناعه ببساطة بالمبادئ العامة المعلنة، يحاول روجر تعريف أنماط التركيب داخل المخ التي لديها القدرة على دعم تلك الأنماط للعملية الفيزيائية الجديدة.

في واقع الأمر، يقلل هذا التلخيص من أهمية وأصالة هذه الأفكار والأسلوب البارع الذي عُرضت به في هذا الكتاب. وفي أثناء الإيضاح، نجد أن لكثير من الموضوعات الضمنية دورًا مهمًّا في تحديد اتجاه تفكير روجر. وربما تكون أكثرها أهميةً قدرة الرياضيات الملحوظة على وصف العمليات الأساسية في العالم الطبيعي. وحسب تعبير روجر عنها، ينبع العالم الفيزيائي بعدة طرق من العالم الأفلاطوني للرياضيات. لكننا لا نشتق رياضيات جديدة من الحاجة إلى وصف العالم، أو من جعل التجربة والملاحظة تتوافقان مع القواعد الرياضية. إذ يمكن أن يأتي فهم تركيب العالم من مبادئ عامة واضحة ومن الرياضيات ذاتها.

ليس من المثير للدهشة أن تكون هذه الاقتراحات الجريئة محل جدل؛ لأن الملمح الأساسي للعديد من اهتمامات الخبراء المنتمين لخلفيات فكرية شديدة الاختلاف ينبع من إسهامات المجادلين. فأحدهما وهو أبنر شيموني يتفق مع روجر حول عدد من أهدافه، إذ يوافق على عدم اكتمال الصيغة القياسية لميكانيكا الكم، بالطريقة نفسها التي شرحها روجر، ويوافق على أن المفاهيم الميكانيكية الكمية وثيقة الصلة بفهم العقل البشري. ومع ذلك يزعم شيموني أن روجر «من متسلقي الجبال الذين يحاولون تسلق الجبال الخطأ» ويقترح أساليب بديلة للنظر إلى المجالات نفسها موضع الاهتمام على نحو بنّاء. وتثير نانسي كارترايت سؤالًا أساسيًّا عما إذا كانت الفيزياء

هي نقطة البداية الصحيحة لفهم طبيعة الوعي. كما تثير القضية الشائكة المتعلقة بكيف يمكن أن تكون القوانين التي تتحكم في نظم علمية مختلفة مشتقة فعليًّا بعضها من بعض. ومن بين هؤلاء، نجد أن أكثرهم نقدًا هو ستيفن هوكنج، صديق روجر وزميله القديم. وبطرق عديدة، فإن موقف هوكنج هو الأقرب إلى ما يمكن أن يُطلق عليه الموقف القياسي للفيزيائي «الوسطي». فهو يتحدى روجر في تطوير نظرية تفصيلية عن الاختزال الموضوعي للدالة الموجية، وينكر أن للفيزياء قدرًا كبيرًا من الأهمية يتيح لها أن تتحدث عن مسألة الوعي. وهذه كلها قضايا قابلة للتبرير، إلا أن روجر يدافع عن موقفه في رده على المجادلين في الفصل الأخير من هذا الكتاب.

وأخيرًا وليس بآخر، إن ما نجح روجر في عمله هو خلق رؤية عن كيف يمكن أن تتطور الفيزياء الرياضية في القرن الحادي والعشرين. وفي فصول الكتاب من الأول للثالث، تمكن روجر من نسج خيوط قصة متصلة الحلقات لتوضيح كيف يمكن أن يتخذ كل جزء فيها موضعه داخل صورة مرتبطة أجزاؤها بعضها مع بعض لنوع جديد تمامًا من الفيزياء، استطاع عن طريقه أن يوضح اهتماماته الرئيسية بعدم القابلية الحسابية والاختزال الموضوعي للدالة الموجية. وسوف يتوقف اختبار هذه المفاهيم على قدرة روجر وآخرين على أن يكوّنوا وعيًا بهذا النوع الجديد من النظرية الفيزيائية. وإذا لم يحرز هذا البرنامج نجاحًا فوريًّا، فهل تكون الأفكار المتضمنة في المفهوم العام مثمرة للتطور المستقبلي للفيزياء والرياضيات النظرية؟ أعتقد أنه سيكون أمرًا مثيرًا للدهشة للغاية إذا جاءت الإجابة بالنفي.

مقدمة هذه الطبعة

إنه من دواعي فخري واعتزازي اختيار مطبعة جامعة كامبريدج أن تتبنى طباعة كتابي هذا الذي ألفته بالاشتراك مع أبنر شيموني ونانسي كارترايت وستيفن هوكنج، والذي حرره مالكولم لونجير الأكثر براعة وتواضعًا. فضلًا عن ذلك، لا بد أن أقر بأن هذا العمل لم يكن نتاج كفاحي لعدة سنوات، محاولًا فيها صقله ليصل إلى درجة معينة من الكمال المنشود. فقد كان إسهامي هو نفسه تقريبًا الوارد في محاضرات تانر الثلاثة، كما قدمتها فعليًّا، بكل ما فيها من سلبيات وتلقائية اتسم بهما منهجي عند تسليم المادة العلمية، وناهيك في ذلك عن ردي على انتقادات المعلقين. وفي واقع الأمر، ربما يكون عدم صقل هذا الكتاب بالقدر الكافي أمرًا قد أعان القارئ على الفهم السريع للمحتوى العلمي، الشيء الذي تفتقده أعمالي الأخرى.

علاوةً على ما سبق، أود أن أوضح أنني في هذه الطبعة عمدت إلى صقل أجزاء من الكتاب لم تكن مفهومة إلى حد بعيد من قبل، حيث إنني حاولت أن أجعل النسخة مفهومة بعد أن أُرجعت إليّ لهذا الغرض. لكن بصفةٍ عامة، أقول إنني قدمت محاضرات تانر في هذا الكتاب تمامًا كما ألقيتها. وبهذا القول، ربما أبدو وكأنني قد أغفلت تقدير الدور الجليل لعملية التحرير على يد البروفيسور مالكوم لونجير، الذي بذل جهدًا في صياغة هذا المحتوى العلمي أكبر من الجهد الذي بذلته. وأقل ما أسهم به في هذا الشأن كان تشجيعه الدائم لي لفعل ما يلزم. كما وفَّر أيضًا كل

الأشكال التخطيطية المعروضة في الكتاب غير المتخذة مباشرةً من أي مصدر (أمّا عن الأشكال الأخرى، فهي تنتمي لي وقد أخذتها عن كتابيّ الصادرين من جامعة أوكسفورد The Emperor's New Mind وShadows of the Mind). وفي هذا الصدد، كم كنت أفضل تقديم نسخ أصلية من الأشكال التخطيطية في هذه الطبعة — كما حدث في سابقتها — لكنّ الوقت لم يسمح لي بفعل ذلك. واستطعنا أن نستعين بعدد من الأشكال التخطيطية القديمة، إلا أنها لم تغط قدرًا كافيًا من المادة اللازمة. وفي واقع الأمر، كرّس مالكولم لونجير قدرًا كبيرًا من وقته الثمين وبذل جهدًا فائقًا لتوفير نسخ ممتازة من الأشكال المطلوبة، ولذا، أدين له كثيرًا بمهاراته وحماسه ووعيه في توفير هذه المادة بهذا القدر من الوضوح.

الجدير بالذكر أنني قد ألقيت هذه المحاضرات في ربيع عام ١٩٩٥، وقد يتعجب القارئ كيف تأثرت الأفكار المعروضة في هذا الكتاب بمرور الزمن. وردًّا على ذلك أرى أنه من الإنصاف أن أذكر أنه، بالتقدير الأولي، لم يحدث تغيير كبير منذ ذلك الحين. فلا تزال الأفكار النظرية على حالها كما كانت، والأفكار التي كانت راسخة لا تزال أيضًا دون تغيير. هذا، إلا أن هناك بعض التطورات المهمة التي حدثت منذ تقديم هذه المحاضرات. ومن بين هذه التطورات، إجراء تجربة عملية، لكنها صعبة، ولديها القدرة على الاختبار الفعلي للأفكار المحددة التي حاولت تعزيزها فيما يتعلق بظاهرة اختزال الحالة الكمية. وتمثلت تلك التجربة في وضع «قطة شرودنجر» Schrödinger's cat في الفضاء. وينبغي عليّ أن أؤكد أن هذه القطة لم تكن قطة حقيقية، فربما كانت مكونة من بلورة متناهية في الصغر ولا يزيد حجمها كثيرًا عن ذرة من الغبار. وطبقًا لأسس ميكانيكا الكم، يمكن أن توضع ذرة الغبار هذه في تراكب superposition، بحيث تكون في مكانين مختلفين في اللحظة نفسها (أي تفصل بينهما مسافة تبلغ نحو قطر نواة ذرة). ويحدث هذا التراكب كجزء من فيزياء العالم ضيق النطاق، والسؤال الآن هو: إلى أي مدى تمتد فيزياء العالم ضيق النطاق إلى فيزياء العالم واسع النطاق؟ وهل يمكن أن يحدث شيء جديد عند الحد الفاصل بين الاثنتين؟

في واقع الأمر، تستهدف التجربة الإجابة عن هذا السؤال. وفي أحد الملحقين الواردين في آخر هذا الكتاب، يوجد وصف مختصر لهذه التجربة. وفي الملحق الثاني أيضًا، شرحت فرضية جديرة بالملاحظة مشتقة من فرضية جودل الشهيرة، قدمها مسبقًا روبين لويس جودشتين Ruben Louis Goodstein عام ١٩٤٤. وهذه الفرضية في الواقع تقدم لنا مثالًا غاية في الأهمية يَسْهُل على غير علماء الرياضيات فهمه. والجدير بالذكر أن مادتي هذين الملحقين لم يرد لهما ذكر في محاضرات تانر الأصلية التي ألقيتها.

إن ما أجادل من أجله، كما أحاول شرحه في هذا الكتاب، يتمثل في أنه يوجد شيء جديد يتعين معرفته عن فيزياء الكون عند الحد الفاصل بين فيزياء العالم واسع النطاق وفيزياء العالم ضيق النطاق. وثمة جزء ثانٍ من هذا الجدال — وهو مستقل إلى حد بعيد عن الأول — ذلك أن هذه الفيزياء الجديدة المفقودة يتطلبها المخ كلما استيقظ الوعي. بالإضافة إلى ذلك، أرى أن هذه الفيزياء المفقودة لا بد أن لها سمة تختلف كثيرًا عما اعتدنا عليه في الفيزياء (الخاصة بالعالم واسع النطاق أو ضيق النطاق على حدٍّ سواء) التي نعرفها الآن. وبوجهٍ خاص، سوف تتضمن الفيزياء الجديدة الأفعال التي لا يمكن محاكاتها بصورة مناسبة على أي جهاز كمبيوتر، مهما كانت قدرته. وأسباب هذا الجدال تنبع من تحليل طبيعة الفهم الرياضي (وبالتحديد تنبع من فرضية جودل شديدة التعمق للمنطق الرياضي). وربما لن يكون أمرًا مثيرًا للدهشة أن يكون الجدال حول هذه الطبيعة موضع خلاف محتدم، ويتعين القول إن هذه النقاشات تبدو وكأنها ستظل هكذا دون حل وافٍ في هذه الأيام بالقدر نفسه الذي كانت عليه مسبقًا حين قدمت محاضراتي التي يعتمد عليها هذا الكتاب.

وثمة قضية أخرى غاية في الأهمية تطرح نفسها للمناقشة تتمثل فيما يأتي: إذا كان المخ فعليًّا سيستفيد من هذه الفيزياء المفقودة (كما أوضحت آنفًا)، فما الشروط الفيزيائية المناسبة لكل من المخ الحاذق والمخ المشوش من أجل أن يكون هذا مجديًا؟ من الواضح أن الصورة العصبية القياسية، التي تُوصف بالكامل غالبًا في إطار الإشارات العصبية التقليدية،

غير كافية لهذا، وطبقًا لذلك، فإنني في أكثر أجزاء الكتاب المعالجة نظريًّا، أقدم وصفًا لنموذج، طبقًا لي وللبروفيسور ستيوارت هامروف Stuart Hameroff، يستعين بالأنابيب المجهرية العصبية تحت الخلوية على أمل الوفاء بالشروط اللازمة. ومرةً أخرى، أوضح أن هناك خلافًا كبيرًا، ولا تزال القضايا الرئيسية دون حل حتى الآن.

وفي النهاية، يظهر لنا موضوع تركيب الكون الأوسع نطاقًا. ومرةً أخرى، لا يوجد إلى الآن حل محدد للقضايا الخلافية. ولكن على ما يبدو، أرى أننا بالقرب من معرفة إجابات بعض أهم الأسئلة. وأنا عن نفسي أنتظر متلهفًا لاكتشاف ما إذا كان هذا النموذج — الموصوف هنا باعتباره المفضل لي والذي وضحه الفنان الألماني إم. سي. إيشر على نحو رائع في الشكلين (١-١٧) و(١-١٩) — يصف فعلًا وبدقة الكون بمقاييسه الأكبر.

روجر بنروز

الفصل الأول

الزمكان وعلم الكون

عنوان هذا الكتاب هو «فيزياء العقل البشري والعالم من منظورين». وفي مستهل الأمر، فإن معرض حديثنا في هذا الفصل من الكتاب يتمثل في العالم من منظور واسع. ويختص الفصلان الأول والثاني بعالمنا الفيزيائي الملموس، الذي قمت بتوضيحه على هيئة شكل كروي في الشكل (١-١)، ومع ذلك فلن تتعرف في هذين الفصلين تفصيليًّا على كل ما يتعلق بعالمنا الفيزيائي، فبدلًا من ذلك، أريد أن أركز أكثر على فهم القوانين الفعلية التي تحكم الطريقة التي يسلكها العالم. ومن أسباب اختياري تقسيم شرح القوانين الفيزيائية إلى فصلين؛ أحدهما معنيٌّ بالقوانين الفيزيائية من منظور واسع والآخر بنظيراتها ولكن من منظور ضيق، أن القوانين التي تحكم السلوكيات واسعة النطاق الخاصة بالعالم تختلف اختلافًا كبيرًا عن تلك التي تتحكم في سلوكياته ضيقة النطاق، ومن ثم تعد حقيقة الاختلاف البالغ لهذه القوانين فيما بينها، وما ينبغي أن نفعله حيال ذلك التناقض الظاهري، من الموضوعات الرئيسية المفترض سردها في الفصل الثالث، الذي يختص بالتحدث عن العقل البشري.

ونظرًا لأنني سوف أتحدث عن العالم الفيزيائي بلغة النظريات الفيزيائية التي تشكّل سلوكه، فسوف أضطر للتحدث قليلًا عن عالم آخر، وهو العالم الأفلاطوني للمُطْلَقات، فيما يتعلق بدوره الذي يقوم به بوصفه عالم الحقائق الرياضية. وفي حقيقة الأمر يمكن للمرء أن يتبنى وجهة النظر القائلة إن العالم الأفلاطوني يحتوي على مطلَقات أخرى، مثل

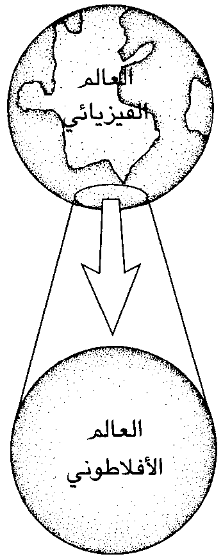


شكل ١-١

الخير والجمال، لكنني سوف أهتم هنا بالمفاهيم الأفلاطونية للرياضيات فقط. ومن الجدير بالذكر أن بعض الناس يجدون أنه من الصعوبة بمكان الاعتقاد في أن هذا العالم أزلي وليس مخلوقًا، ولعلهم يفضلون التفكير في المفاهيم الرياضية باعتبارها مثاليات لعالمنا الفيزيائي فقط، وعلى أساس هذه الرؤية، يمكن التفكير في العالم الرياضي بوصفه ناشئًا من عالم الأجسام الفيزيائية (انظر الشكل ١-٢).

والآن ليست هذه هي الكيفية التي أفكر بها في الرياضيات أو — حسب اعتقادي — الكيفية التي يفكر بها معظم الرياضيين أو الفيزيائيين الرياضيين في العالم؛ إنهم يفكرون في العالم بطريقة أكثر تباينًا من هذا، إنهم يفكرون في العالم بوصفه بنيةً محكومة بدقة طبقًا لقوانين رياضية أبدية، وبذلك فهم يفضلون التفكير في العالم الفيزيائي، على نحو ملائم، باعتباره ناشئًا من عالم الرياضيات (الأبدي)، كما يتضح في الشكل (١-٣)، وسوف يكون لهذا الشكل أيضًا أهميته فيما يتعلق بما سأوضحه في الفصل الثالث، علاوةً على أنه يتضمن أيضًا معظم ما سيذكر في الفصلين الأول والثاني.

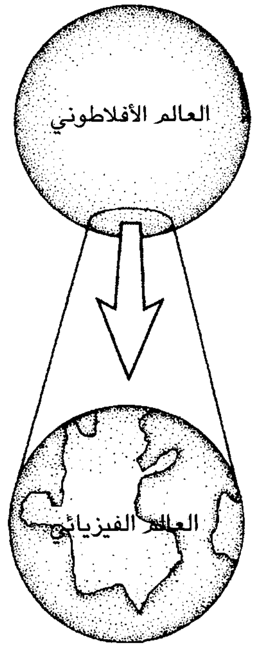
من الأمور الجديرة بالملاحظة حول سلوك العالم، كيف يبدو متأصلًا في علم الرياضيات بهذه الدقة المتناهية؛ فكلما زاد فهمنا للعالم الفيزيائي وتعمق بحثنا في قوانين الطبيعة بدا لنا بصورة أكثر وضوحًا كما لو أن العالم الفيزيائي بدأ في التلاشي تقريبًا ولا يتبقى لنا إلا التعامل مع الرياضيات،



شكل ١-٢

وكلما زاد عمق فهمنا لقوانين الفيزياء انسقنا أكثر إلى عالم الرياضيات والمفاهيم الرياضية.

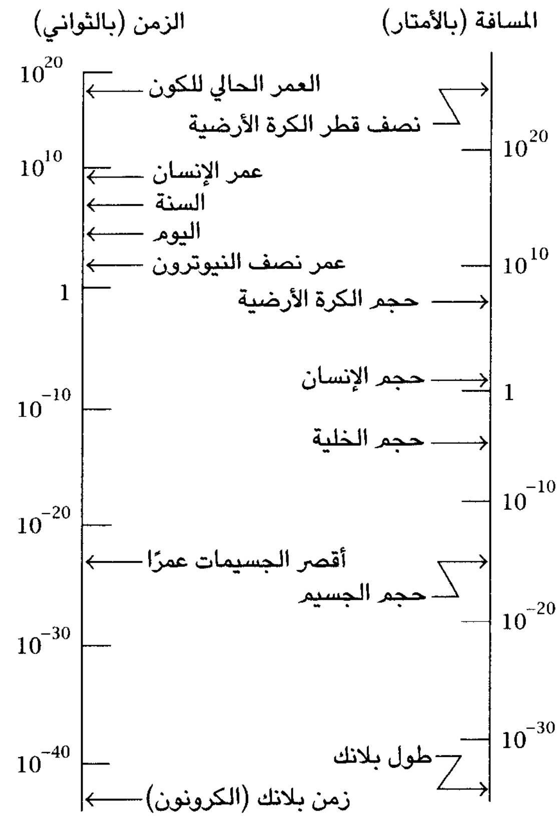
دعنا الآن — أيها القارئ العزيز — ننظر إلى المقاييس التي يتعين علينا التعامل معها في الكون وأيضًا إلى دور الموضع الذي نحتله فيه، وبمقدوري تلخيص كل هذه المقاييس في شكل واحد (وهو الشكل ١-٤): في الجانب الأيسر من الشكل، تظهر المقاييس الزمنية، وفي الجانب الأيمن يوجد ما يقابلها من مقاييس مكانية (البعد/المسافة)، وفي أسفل الشكل إلى اليسار نجد المقاييس الزمنية الصغرى التي تعتبر ذات مغزى من الناحية الفيزيائية. ويتمثل المقياس الزمني في نحو 10^{-43} من الثانية، ونطلق عليه غالبًا مقياس بلانك الزمني أو الكرونون chronon، وهذا المقياس الزمني يُعد أصغر من أي مقياس آخر في مجال فيزياء الجسيمات، على سبيل المثال، فإن أقصر الجسيمات عمرًا، الذي يسمى الرنين resonance، يظل على قيد الحياة لمدة 10^{-23} ثانية تقريبًا، وفي أعلى الشكل إلى اليسار نرى



شكل ١-٣

موضعي اليوم والسنة يُشار إليهما بسهمين، وفي أعلى الشكل نجد العمر الحالي للكون.

في الجانب الأيمن من الشكل نقدم المسافات المطابقة لهذه المقاييس الزمنية، ويُذكر أن الطول المطابق لزمن بلانك (الكرونون) هو الوحدة الأساسية للطول المعروفة بطول بلانك، وهذان المفهومان لزمن بلانك وطول بلانك يتنحّيان بشكل طبيعي عندما نحاول دمج النظريات الفيزيائية التي تصف العالم من منظوريه الواسع والضيق معًا — أي دمج نظرية النسبية العامة لأينشتاين التي تعبر عن فيزياء العالم من منظور واسع بميكانيكا الكم التي تصف فيزياء العالم من منظور ضيق. وعند تقديم هذه النظريات معًا، فإن المفهومين الخاصين بطول بلانك وزمن بلانك يصبحان أساسيين، وفي الشكل السابق، يعتمد حدوث الإحلال والتبديل بين المحورين على سرعة



شكل ١-٤: الأحجام والمقاييس الزمنية في الكون.

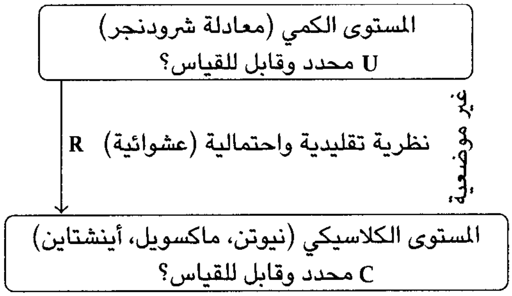
الضوء، وبذلك يتحول الزمن إلى مسافة عندما نحدد المسافة التي تقطعها إحدى الإشارات الضوئية في ذلك الوقت.

تتراوح أحجام الأجسام الفيزيائية الممثلة في الشكل السابق من نحو 10^{-15} من المتر — وهو الحجم الذي تتميز به الجسيمات — إلى نحو 10^{27} من المتر، وهو نصف قطر الكرة الأرضية المعروف في الوقت الحالي، وهو أيضًا عمر الكون مضروبًا في سرعة الضوء على نحو تقريبي. ومن المثير للاهتمام أن نلاحظ موقعنا في الشكل، أي المقياس البشري، أما الأبعاد في

الفضاء فيمكننا ملاحظة أننا إلى حدٍّ ما في منتصف الشكل؛ إذ إن حجمنا يعتبر هائلًا مقارنة بطول بلانك، وبحجم الجسيمات أيضًا، أما بالمقارنة بمقياس أبعاد الكون فإن حجمنا بالغ الضآلة، وفي الواقع تعتبر أحجامنا أصغر من حجم الكون أكثر من كونها أكبر من حجم الجسيمات. وعلى الجانب الآخر — فيما يتعلق بالأبعاد الزمنية — يتشابه عمر الإنسان مع عمر الكون تقريبًا! وفي هذا الصدد يتحدث الناس عن الطبيعة الزائلة للوجود، لكن عندما ننظر إلى عمر البشر كما هو موضح بالشكل، يمكن رؤية أننا لسنا كذلك على الإطلاق، حيث إننا نعيش بطريقة أو بأخرى الفترة الزمنية نفسها الخاصة بالكون، وبالطبع هذا هو ما يتعلق بالمقاييس اللوغاريتمية، لكنه يُعد رأيًا صائبًا عندما نكون معنيين بمثل هذه الأبعاد الهائلة، بمعنى آخر، فإن إجمالي أعمار البشر التي تصنع حياة الكون أقل للغاية من مجموع أزمنة بلانك أو حتى إجمالي أقصر الجسيمات عمرًا التي تصنع عمر الإنسان، ومن ثم فنحن في حقيقة الأمر تركيبات بالغة الاستقرار في الكون، ومادامت الأحجام الفضائية هي المعنية، فإننا نكون في المنتصف إلى حدٍّ بعيد؛ فإننا لا نتعامل مباشرةً مع فيزياء الأجسام بالغة الحجم أو بالغة الصغر، فنحن إذن بين هؤلاء وبين هؤلاء إلى حدٍّ بعيد، وفي الواقع، بالنظر إلى حساب اللوغاريتمات، فإن كل الأجسام الحية بدءًا من الكائنات وحيدة الخلية إلى الأشجار والحيتان تعتبر تقريبًا ذات حجم متوسط.

ما أنواع الفيزياء التي تُطبق على هذه المقاييس المختلفة؟ دعني أعرض عليك الآن الشكل الآتي — وهو الشكل (١-٥) — الذي يلخص الفيزياء إجمالًا، وفي حقيقة الأمر، أعتقد أنني مضطر إلى التجاوز عن سرد بعض التفاصيل هنا، بطبيعة الحال، مثل جميع المعادلات، لكن بالطبع يتعين الإشارة إلى النظريات الأساسية التي يستخدمها الفيزيائيون.

النقطة الأساسية في علم الفيزياء هي أننا نستخدم نوعين مختلفين جدًّا من الإجراءات، فحتى نَصِف السلوك ضيق النطاق للعالم، نستخدم ميكانيكا الكم التي أشرت إليها بالمستوى الكمي في الشكل (١-٥)، وسوف أتحدث عن هذا بمزيد من التفصيل في الفصل الثاني، ومما يقوله الناس



شكل ١-٥

عن ميكانيكا الكم إنها غامضة وغير محددة ولا يمكن التنبؤ بها، لكن ذلك ليس صحيحًا، ومادام الأمر متعلقًا بالمستوى الكمي، نقول إن ميكانيكا الكم محددة ودقيقة، والجدير بالذكر أنني استخدمت حرف **U** في هذا الشكل لوصف نشاط المستوى الكمي، وتتضمن ميكانيكا الكم — في صورتها الأكثر شيوعًا — استخدام معادلة تسمى معادلة شرودنجر Schrödinger التي تحكم سلوك الحالة الفيزيائية لمنظومة كمية — تُسمَّى حالتها الكمية — وهذه معادلة محددة. وتظهر عدم القدرة على تحديد ميكانيكا الكم عند تنفيذ ما يسمى بإجراء قياس فقط، ويتضمن ذلك تكبير حدث من المستوى الكمي إلى المستوى الكلاسيكي، وسوف أتحدث أكثر من ذلك عن هذا الأمر في الفصل الثاني.

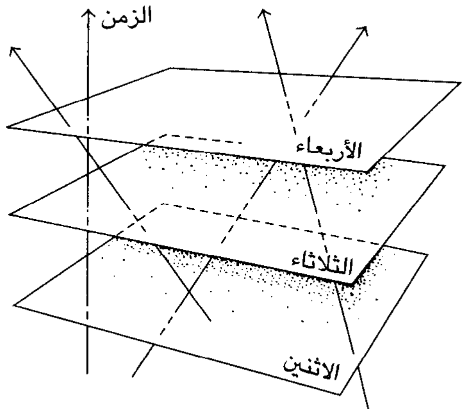
إذا نظرنا إلى العالم نظرةً واسعة النطاق، سنجد أننا دائمًا نستعين بالفيزياء الكلاسيكية بقوانينها التي تعتبر محددة للغاية، وهذه القوانين الكلاسيكية تشتمل على قوانين الحركة لنيوتن وقوانين ماكسويل للمجال الكهرومغناطيسي التي تجمع بين الكهرباء والمغناطيسية والضوء، ونظريتي أينشتاين الخاصتين بالنسبية؛ نظرية النسبية الخاصة التي تتعامل مع السرعات الكبيرة، ونظرية النسبية العامة التي تتعامل مع مجالات الجاذبية القوية، وهذه القوانين تطبق بدقة عالية للغاية عند التعامل مع الكون من منظور واسع.

وثمة ملاحظة هامشية على الشكل (١-٥)، حيث يمكن رؤية أنني أوردت إشارة إلى «القابلية للقياس» في كل من فيزياء الكم والفيزياء الكلاسيكية، والجدير بالذكر أن هذا ليست له علاقة بهذا الفصل أو بالفصل الثاني، لكن ستكون له أهميته في الفصل الثالث الذي سوف أتحدث فيه باستفاضة عن القابلية للقياس.

أما الأجزاء المتبقية من الفصل الحالي، فسوف أهتم مبدئيًّا فيها بنظرية النسبية لأينشتاين، وسأهتم اهتمامًا خاصًّا، بكيفية عمل النظرية وبدقتها الفائقة وسأتحدث بقدر ما عن تميزها كنظرية فيزيائية. لكن دعنا في البداية ننظر معًا بإمعان إلى النظرية النيوتنية؛ فالفيزياء النيوتنية — تمامًا كما هي الحال في نظرية النسبية — تتيح استخدام مصطلح الزمكان (الزمان والمكان معًا)، وعلى وجه التحديد، صِيغ هذا المصطلح للمرة الأولى من قِبل كارتان Cartan فيما يتعلق بالجاذبية النيوتنية، بعد فترة من تقديم أينشتاين نظرية النسبية العامة. وتُمَثَّل فيزياء جاليليو ونيوتن في زمكان أُنشئ من أجله إحداثي زمني كوني، ممثلٌ هنا في شكل (١-٦) وهو متجهٌ لأعلى، ولكل قيمة زمنية ثابتة مقطعٌ مكاني هو فضاء إقليدي ثلاثي الأبعاد Euclidean 3-space، ممثل في هذا الشكل بأسطح أفقية، وتمثل هذه الشرائح الفضائية — الممثلة عبر الشكل — فترات من التزامن، كملمح أساسي لصورة الزمكان النيوتنية.

وهكذا فإن كل ما يحدث ظهر يوم الاثنين مثلًا يوجد على شريحة أفقية واحدة في مخطط الزمكان، وكل ما يحدث ظهيرة الثلاثاء يوجد على الشريحة التالية الموضحة بالشكل ... إلخ. ويتخلل الزمن مخطط الزمكان، وتتعاقب المقاطع الإقليدية واحدًا تلو الآخر مع مرور الزمن، وبذلك يصبح بوسع كل المراقبين — مهما كانت الكيفية التي يتحركون بها خلال الزمكان — الاتفاق حول زمن وقوع الأحداث؛ لأن كل شخص منهم يستخدم الشرائح الزمنية نفسها لقياس مرور الزمن.

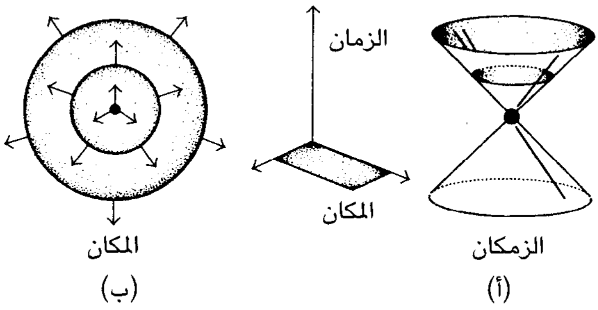
في نظرية أينشتاين عن النسبية الخاصة يتعين أن نتبنى وجهة نظر مختلفة، وتكون صورة الزمكان أساسية فيها بصورة مطلقة، والاختلاف



شكل ١-٦: الزمكان عند جاليليو: تمثيل الجسيمات في حركتها المنسقة بخطوط مستقيمة.

الأساسي يكمن في أن الزمن لا يكون هو الشيء الكوني الأساسي كما هي الحال في النظرية النيوتنية، ولتقدير كيف تختلف النظريتان من الضروري أن نفهم جزءًا أساسيًّا من نظرية النسبية، وهو تلك التراكيب المسماة بالمخاريط الضوئية.

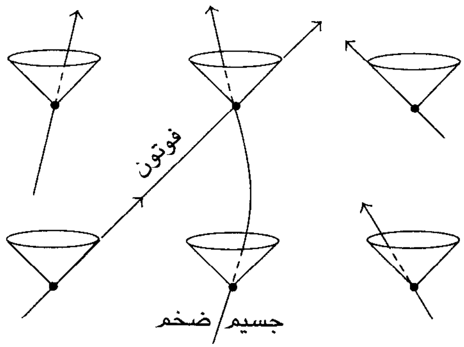
ما المخروط الضوئي؟ المخروط الضوئي هو ذلك المُعبر عنه في الشكل (١-٧)، فنحن نتخيله على أنه وميض ضوئي يحدث عند نقطة معينة في لحظة معينة — بمعنى عند وقوع حدث في زمكان معين — وتنتقل الموجات الضوئية منبعثةً من ذلك الحدث، الذي هو مصدر الوميض، بسرعة الضوء، وبالتصوير المكاني المجرد (انظر الشكل ١-٧ القسم ب)، نستطيع تمثيل مسارات الموجات الضوئية خلال الفراغ بشكل كروي يكبر حجمه بسرعة الضوء. ويمكننا الآن تمثيل حركة الموجات الضوئية هذه باستخدام مخطط الزمكان (انظر الشكل ١-٧ القسم أ)، حيث يحتل الزمن الجزء العلوي من المخطط ويشير الإحداثيان المكانيان إلى انتقال الموجات الضوئية أفقيًّا، كما هي الحال في النظرية النيوتنية في الشكل (١-٦). ولسوء الحظ، فإننا في جزء الزمكان الموضح في الشكل (١-٧) القسم (أ)، نمثل بعدين أفقيين



شكل ١-٧: توضيح حالة وميض ضوئي من حيث انتشاره في (أ) الزمكان و(ب) المكان.

للمكان فقط؛ لأن الزمكان في الصورة ثلاثي الأبعاد فقط، ونرى الآن أن الوميض تمثله نقطة (أو حدث) في المركز وأن المسارات التالية للأشعة الضوئية (أو الموجات) التي تقطع الأسطح الأفقية للمكان بعد اتخاذها شكل دوائر، تتزايد أنصاف أقطارها طبقًا لسرعة الضوء أعلى الشكل، ويمكن رؤية مسارات الأشعة الضوئية تكوّن مخاريط في مخطط الزمكان، ومن ثم يمثل المخروط الضوئي تاريخ هذا الوميض الضوئي، حيث ينتشر الضوء بعيدًا عن مركزه على طول المخروط الضوئي، وهذا يعني أنه ينتشر بسرعة الأحجام والمقاييس الزمنية في الكونضوء نحو المستقبل. ويمكن أيضًا للأشعة الضوئية أن تصل إلى المركز على طول المخروط الضوئي في اتجاه الماضي، وذلك الجزء من المخروط الضوئي يُعرف باسم المخروط الضوئي المنقضي، وكل المعلومات التي يستقيها المراقب بواسطة الموجات الضوئية تصل إلى المركز على طول هذا المخروط.

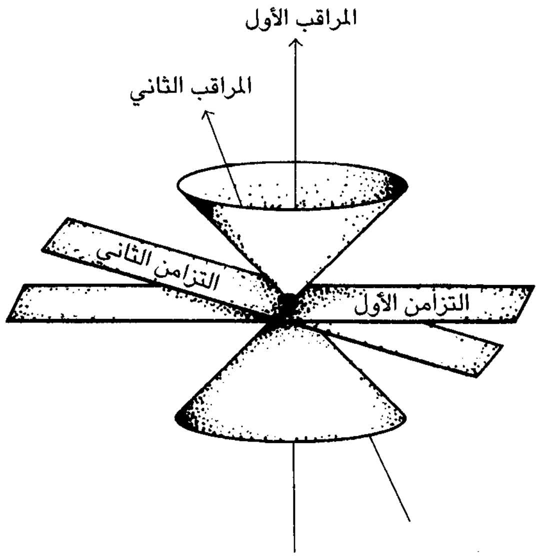
تمثل المخاريط الضوئية أكثر التراكيب أهميةً في الزمكان، وعلى نحو خاص تمثل حدود التأثير السببي، ويُمثَّل تاريخ أحد الجسيمات في الزمكان بخط متجه لأعلى في مخطط الزمكان، ويتعين على هذا الخط أن يظل داخل نطاق المخروط الضوئي (انظر شكل ١-٨)، وهذه مجرد وسيلة أخرى للقول إن أي جسيم فيزيائي لا يستطيع أن ينتقل بسرعة أكبر من سرعة الضوء،



شكل ١-٨: شرحٌ لحركة جسيم في زمكان نظرية النسبية، المعروف باسم زمكان مينكوفسكي Minkowski أو هندسة مينكوفسكي، حيث تتراص المخاريط الضوئية في نقاط مختلفة في الزمكان ويمكن للجسيمات أن تنتقل في نطاق مخاريطها الضوئية المستقبلية فقط.

هذا، إذ لا تستطيع أية إشارة الانتقال من داخل المخروط الضوئي المستقبلي إلى خارجه، ولذلك فإن المخروط الضوئي يمثل فعليًّا حدود السببية.

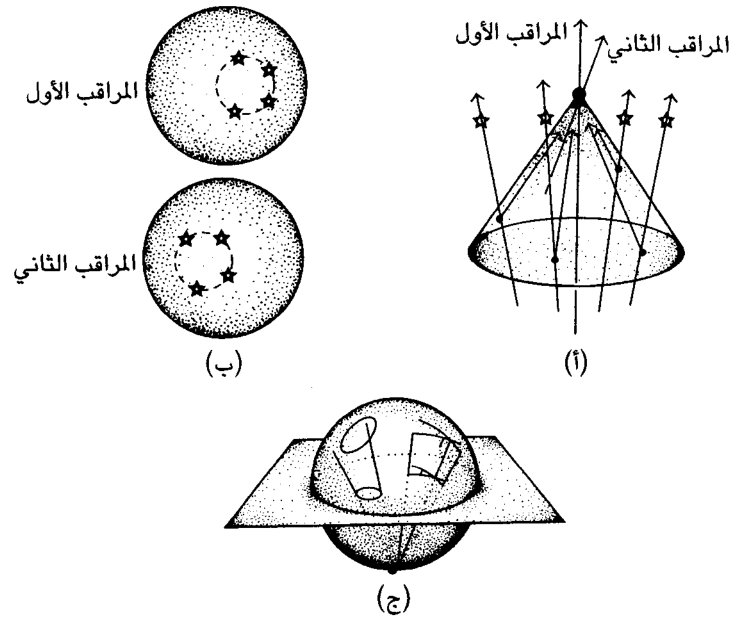
ثمة بعض الخصائص الهندسية الجديرة بالملاحظة التي ترتبط بالمخاريط الضوئية، ولننظر الآن إلى حالة اثنين من المراقبين اللذين يتحركان بسرعتين مختلفتين خلال الزمكان، ولا يوجد تزامن مطلق في النسبية، على عكس ما يحدث في النظرية النيوتنية، التي تتماثل فيها مستويات التزامن لجميع المراقبين؛ فالشخصان القائمان بالمراقبة اللذان يتحركان بسرعتين مختلفتين يحددان مستويَي التزامن الخاصين بهما باعتبارهما مقطعين مختلفين عبر الزمكان، كما هو موضح في الشكل (١-٩). وفي حقيقة الأمر هناك طريقة مميزة للغاية للانتقال من مستوى إلى آخر عن طريق ما يُطلق عليه تحويلات لورينتز Lorentz transformations، وتؤلف هذه التحويلات ما يسمى بمجموعة لورينتز، وكان اكتشاف هذه المجموعة مقومًا أساسيًّا في اكتشاف أينشتاين لنظرية النسبية الخاصة، ويمكن فهم مجموعة



شكل ١-٩: توضيحٌ لنسبية التزامن طبقًا لنظرية النسبية الخاصة لأينشتاين؛ إذ يتحرك المراقبان الأول والثاني بصورة نسبية أحدهما للآخر خلال الزمكان، والأحداث المتزامنة للمراقب الأول لا تكون كذلك للمراقب الثاني، والعكس صحيح.

لورينتز على أنها مجموعة من تحويلات (خطية) خاصة بالزمكان، في ظل ثبات أي مخروط ضوئي.

يمكن أيضًا أن ندرك تمامًا أهمية مجموعة لورينتز من وجهة نظر مختلفة قليلًا عما سبق، وكما سبق لي وأكدت، فإن المخاريط الضوئية تُعتبر هي التراكيب الأساسية في الزمكان. لنتصور معًا أنك قمت بدور المراقب في مكان ما في الفراغ لرصد الكون، وما تراه هو الأشعة الضوئية المنبعثة من النجوم لتتجه إلى عينيك، وطبقًا لوجهة نظر الزمكان فإن الأحداث التي ترصدها هي نقاط تقاطع الخطوط العالمية الخاصة بالنجوم مع المخروط الضوئي المنقضي، كما يتضح من الشكل (١-١٠) القسم (أ)، بالطبع ستلاحظ على طول المخروط الضوئي المنقضي مواقع النجوم في نقاط معينة، وتظهر



شكل ١-١٠: توضيحٌ لكيفية رصد المراقبين الأول والثاني للسماء؛ في القسم (أ) من الشكل، يلاحظ كلاهما النجوم على طول المخروط الضوئي المنقضي، وتدل النقاط السوداء على نقاط تقاطع النجوم مع المخروط الضوئي، وتنتقل الإشارات الضوئية من النجوم إلى المراقبين على طول المخروط الضوئي كما هو موضح، ويتحرك المراقب الثاني خلال الزمكان بسرعة معينة مقارنةً بالمراقب الثاني. ويوضح القسم (ب) من الشكل مواضع النجوم في السماء كما يراها كل من المراقبين، عندما يتقابلان عند نقاط معينة في الزمكان. ويبين القسم (ج) من الشكل طريقة جيدة توضح أن رصد السماء بالطريقة نفسها لكلا المراقبين يحدث عن طريق الإسقاط المجسم؛ حيث الدوائر التي تتطابق مع الدوائر وثبات الزوايا.

لك هذه النقاط في مواقعها على القبة السماوية التي تحيط بك (التي يُطلق عليها أيضًا الكرة السماوية). والآن لنتخيل أن هناك شخصًا آخر يقوم بعملية المراقبة، ويتحرك بسرعة أكبر مقارنةً بك، ويمر أيضًا بالقرب منك

في اللحظة التي تراقبان فيها السماء معًا، وهذا المراقب الثاني يرى النجوم نفسها التي تراها، لكنه يجد أنها تتخذ مواضع مختلفة على القبة السماوية (انظر شكل ١-١٠ القسم ب)، وهذا الاختلاف هو ما يعرف باسم الزيغ aberration. وهناك مجموعة من التحويلات تتيح لنا استنباط العلاقة بين ما يراه كلا المراقبين على القبة السماوية التي يرصداها، وكل واحدة من هذه التحويلات تطابق القبة السماوية التي تراها مع القبة السماوية التي يراها المراقب الآخر، بالإضافة إلى ذلك تُعتبر هذه التحويلات من نوع خاص جدًّا؛ فهي تطابق الدوائر مع نظيراتها وتحافظ على فرق الزوايا، وهكذا إذا بدت لك السماء على شكل دائرة فإنها لا بد أن تظهر هكذا أيضًا للمراقب الآخر.

ثمة طريقة بالغة الفاعلية لوصف الكيفية التي يحدث بها هذا الأمر وسأوضحها في السطور القليلة الآتية لأبين أن علم الرياضيات الذي يشكل أساسيات الفيزياء يتميز بميزة خاصة للغاية، ويوضح الشكل (١-١٠) القسم (ج) كرة يقطعها سطحٌ أفقي مارٌّ بمركزها، وفي الواقع يمكننا رسم أشكال على سطح الكرة، ثم نفحص كيفية إسقاطها على هذا السطح الأفقي من القطب الجنوبي، كما هو موضح بالشكل، وهذا النوع من الإسقاط يُعرف باسم الإسقاط المجسم أو الإسقاط الإستريوجرافي stereographic projection وله أيضًا بعض الخصائص الفائقة، وتُسقط الدوائر المرسومة على الكرة على دوائر مماثلة على السطح الأفقي، كما تُسقط الزوايا بين المنحنيات المرسومة على الكرة على الزوايا نفسها على السطح الأفقي، وكما سأناقش بمزيد من التفصيل في الفصل الثاني (انظر الشكل ٢-٤)، فإن هذا الإسقاط يتيح لنا تمييز النقاط الخاصة بالكرة بأعداد مركبة (وهي الأعداد التي تحتوي على الجذر التربيعي لسالب واحد) والأعداد التي تُستخدم أيضًا في تحديد النقاط الخاصة بالسطح الأفقي، إلى جانب الأعداد اللامتناهية، لتتخذ الكرة التركيب المعروف باسم كرة ريمان Riemann sphere.

ولمن لديهم اهتمام بالرياضيات، يتمثل تحويل الزيغ في المعادلة الآتية:

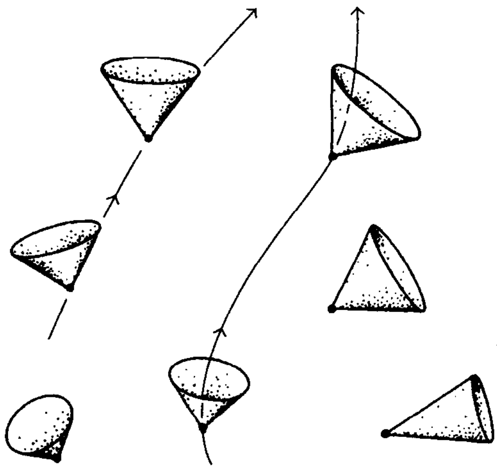
$$u \longrightarrow u' = \frac{\alpha u + \beta}{\gamma u + \delta}$$

وكما يعلم علماء الرياضيات جيدًا فإن هذا التحويل يطابق الدوائر بالدوائر ويحافظ على قياسات الزوايا، وتُعرف التحويلات من هذا النوع باسم تحويلات موبياس Möbius transformations، ولأهدافنا الحالية نحتاج فقط إلى ملاحظة مدى تميز معادلة لورينتز (الخاصة بالزيغ) عند كتابتها باستخدام المعامل (أو المتغير) المركب u.

تُعتبر الصيغة الرياضية بالغة البساطة طبقًا لنظرية النسبية الخاصة، وهي نقطة لافتة للنظر فيما يتعلق بطريقة دراسة التحويلات، وإذا عبّرنا عن تحويل الزيغ المقابل طبقًا للميكانيكا النيوتنية، تصبح الصيغة أكثر تعقيدًا، وغالبًا يثبت أن الرياضيات — عندما نركز على الأسس ونحاول تطوير نظرية أكثر إحكامًا — تتحول إلى شكل أكثر بساطة، حتى لو كانت العملية الشكلية تبدو من الوهلة الأولى أكثر تعقيدًا، وفي واقع الأمر، نجد أن هذه النقطة المهمة واضحة للغاية في التناقض بين نسبية جاليليو ونسبية أينشتاين.

لذلك فإننا فيما يتعلق بنظرية النسبية الخاصة، نتعامل مع نظرية تُعتبر — من نواحٍ عديدة — أكثر بساطة من الميكانيكا النيوتنية، ومن وجهة نظر الرياضيات — وبالتحديد في رأي أنصار نظرية المجموعة group theory — تُعتبر نظرية النسبية الخاصة أفضل بكثير من غيرها؛ ففي هذه النظرية يكون الزمكان منبسطًا وتتراص كل المخاريط الضوئية عموديًّا وبطريقة منظمة كما هو موضح في الشكل (١-٨). وإذا تقدمنا الآن خطوة واحدة نحو النسبية العامة لأينشتاين؛ أي نظرية الزمكان في ظل وجود الجاذبية، لبدت الصورة مشوشة من النظرة الأولى؛ فجميع المخاريط الضوئية مبعثرة في المكان (انظر شكل ١-١١). والآن، وكما أقول دائمًا، كلما استطعنا تطوير نظريات أعمق وأكثر تخصصًا، غدت الرياضيات أبسط. لكن لننظر الآن إلى ما يحدث على أرض الواقع؛ فكثيرًا ما تتحول الصيغ الرياضية والنظريات من البساطة إلى التعقيد، وعلى أية حال، فإن هذه الأمور كثيرًا ما تحدث، كما سبق وذكرنا.

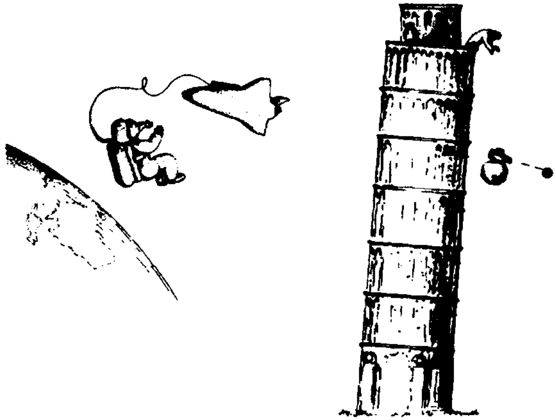
والآن دعني أذكِّرك بالمقومات الأساسية لنظرية أينشتاين عن الجاذبية، وأحد هذه المقومات الأساسية هو مبدأ التكافؤ لجاليليو، وفي الشكل (١-١٢)



شكل ١-١١: صورة للزمكان المنحني.

القسم (أ) تصورٌ لجاليليو واقفًا منحنيًا على قمة برج بيزا في أثناء إسقاطه حجرين أحدهما كبير والآخر صغير، وسواء أكان جاليليو قد أجرى هذه التجربة أم لا، فإنه بالتأكيد كان يفهم تمامًا أنه إذا تجاهلنا تأثيرات مقاومة الهواء فإن الحجرين سيصلان إلى الأرض في الوقت نفسه، وإذا حدث وكنت جالسًا على أحد هذين الحجرين، وكنت تنظر إلى الحجر الآخر وهما يسقطان معًا، سترى الحجر الثاني وهو يهوي أمامك، (وفي هذا الشكل، عرضت الفكرة نفسها في ظل وجود كاميرا فيديو مثبتة أعلى أحد الحجرين لإجراء الملاحظة). وفي الوقت الراهن، مع السفر في الفضاء، فإن هذا الأمر يُعد ظاهرة شائعة للغاية؛ فقد رأينا حديثًا رجل فضاء بريطانيًّا يسير في الفضاء، ومثل الحجر الكبير والحجر الصغير، تحلِّق سفينة الفضاء أمام هذا الرجل، وتلك هي الظاهرة نفسها المطابقة لمبدأ التكافؤ لجاليليو.

لذلك إذا نظرت إلى الجاذبية نظرةً صائبة، فيما يتعلق بمحاور الإسناد المرجعية (أو الإحداثيات) المتجهة لأسفل، فسيتضح اختفاء (أو بالأحرى انعدام) الجاذبية وقتئذٍ، وهذا أمرٌ صحيح في الواقع. من ناحية أخرى،



(ب) (أ)

شكل ١-١٢: في الجزء (أ)، جاليليو يسقط حجرين (مثبت بأحدهما كاميرا فيديو) من برج بيزا المائل. وفي الجزء (ب)، يرى رجل الفضاء مركبة الفضاء وهي تُحلِّق أمامه، غير متأثرة بالجاذبية على ما يبدو.

لا تقول نظرية أينشتاين إن الجاذبية تختفي — حيث إنها تؤيد أن قوة الجاذبية هي التي تختفي — وعلى ما يبدو فإن ثمة شيئًا متجاهلًا وهو تأثير المد والجذر للجاذبية.

بالإضافة إلى ما سبق، دعني أقدم لك الآن قدرًا بسيطًا آخر من الرياضيات: مما لا شك فيه أننا في حاجة إلى وصف منحنى الزمكان وهذا هو ما جرى توضيحه باستخدام فرع من فروع الرياضيات يُعرف بالتنسور tensor (أو الكمية الممتدة) الذي أطلقت عليه اسم **ريمان**[1] في المعادلة الآتية، ويسمى هذا الفرع من الرياضيات تنسور منحنى ريمان بالفعل، لكنني لن أقول لك ما طبيعته فيما عدا أنه سيُمَثَّل بالحرف **R** في المعادلة الآتية مع عدد من الأدلة بجانبه لأسفل والمُشار إليها بعدة نقاط، ويتألف تنسور منحنى

[1] نسبة إلى عالم الرياضيات الألماني برنهارد ريمان Bernhard Riemann.

ريمان من جزأين: أحدهما يُسمى منحنى **ويل** Weyl curvature والآخر يُسمى منحنى **ريتشي** Ricci curvature، ومن ثم تصبح لدينا المعادلة التخطيطية الآتية:

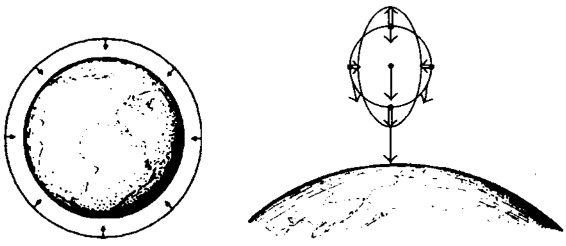
ريمان = ويل + ريتشي

R.... = C.... + R.. g..

وبالطبع يعبر كل من ....C و..R عن تنسور منحنى ويل وتنسور منحنى ريتشي على التوالي، ويعبر ..g عن التنسور المتري.

يقيس منحنى ويل على نحو فعّال تأثير المد والجزر، ولكن ماذا نعني بتأثير المد والجزر؟ لمعرفة الإجابة عن هذا السؤال ينبغي عليك أن تتذكر أنه من وجهة نظر رجل الفضاء، يبدو أن هناك ما يُسمى باختفاء الجاذبية، لكنّ ذلك ليس صحيحًا تمامًا. لنتصور معًا أن رجل الفضاء محاط بكرة من الجسيمات، وهي من الناحية المبدئية ساكنة بالنسبة لرجل الفضاء، والآن في البداية سوف تحلق هذه الكرة في الفضاء فقط، لكنها على الفور تبدأ في تغيير سرعتها بسبب الاختلافات الطفيفة في قوة الجاذبية الأرضية عند نقاط مختلفة على الكرة الأرضية، (لاحظ أنني أصف هذا التأثير من منظور نيوتن، لكنني أعتقد أنه مناسب إلى حد بعيد)، وتتسبب هذه الاختلافات الطفيفة في تغيير الشكل الأصلي لكرة الجسيمات لتتخذ شكلًا بيضاويًّا، كما هو موضح في الشكل (١-١٣) القسم (أ).

يحدث هذا التغير في شكل الكرة جزئيًّا بسبب قوة الجاذبية التي تُعد أكبر إلى حدٍّ ما للأرض والتي تعمل على جذب الجسيمات الأقرب إلى الأرض، وقوة الجاذبية الأقل لتلك الجسيمات البعيدة عنها، بالإضافة إلى ذلك يحدث هذا الأمر جزئيًّا لأنه عند جانبي الكرة تتجه الجاذبية الأرضية للداخل، ويتسبب هذا في تغير شكل الكرة لتتخذ شكلًا بيضاويًّا، وقد أُطلق أيضًا هذا الاسم على تأثير المد والجذر لسبب غاية في الأهمية، وهو أنه في حالة استبدال الأرض بالقمر وكرة الجسيمات بالأرض بما فيها من محيطات، فسيصبح للقمر بالتالي تأثير الجاذبية نفسه على سطح المحيطات مثلما



شكل ١-١٣: (أ) تأثير المد والجزر؛ تبين الأسهم المزدوجة تغير السرعة النسبية. (ب) عندما تحيط الكرة بالمادة (على الكرة الأرضية)، تنتج سرعة إجمالية داخلية.

تؤثر الأرض على كرة الجسيمات؛ إذ ينجذب سطح البحر القريب من القمر في اتجاهه، وتندفع أسطح البحار على الجانب الآخر من الأرض، في واقع الأمر، بعيدًا عنه، وهذا التأثير من شأنه أن يؤدي إلى انبعاج سطح البحر على جانبي الأرض، إلى جانب أنه أيضًا السبب وراء عمليتي الجزر والمد العاليين اللذين يحدثان يوميًّا.

من وجهة نظر أينشتاين فإن تأثير الجاذبية هو نفسه ببساطة تأثير المد والجذر، وقد عُرِفَ هذا التأثير بصفة أساسية من خلال منحنى ويل؛ أي من خلال الجزء ....C من منحنى ريمان، ولهذا الجزء من تنسور المنحنى تأثيرٌ حيادي على الحجم لا يؤدي إلى تغييره؛ بمعنى أنه إذا كنت بصدد فحص التغير المبدئي في سرعات جسيمات الكرة، فإن حجم الكرة وحجم الشكل البيضاوي — الذي تغير شكل الكرة إليه — يظلان كما كانا في البداية.

ويُعرف الجزء المتبقي من المنحنى باسم منحنى ريتشي وله تأثير تناقصي على الحجم، ومن الشكل (١-١٣) القسم (ب)، يمكن أن نرى أنه بدلًا من أن تكون الأرض أسفل الشكل — كما في القسم (أ) — أصبحت داخل كرة الجسيمات، وأصبح حجم كرة الجسيمات يتناقص مع تغير سرعة الجسيمات واتجاهها إلى الداخل، ويصبح قدر نقص الحجم مقياسًا لمنحنى

ريتشي. وتقول لنا نظرية أينشتاين إن منحنى ريتشي يتحدد بمقدار المادة الموجودة داخل كرة صغيرة بالقرب من هذا الموضع في الفراغ، وبعبارةٍ أخرى، تخبرنا كثافة المادة — عندما تُحَدَّد كما يجب — كيف تتسارع الجسيمات إلى الداخل في اتجاهها لذلك الموضع في الفراغ، ومن ثم تصبح نظرية أينشتاين هي نفسها تقريبًا نظرية نيوتن عند التعبير عنها على هذا النحو.

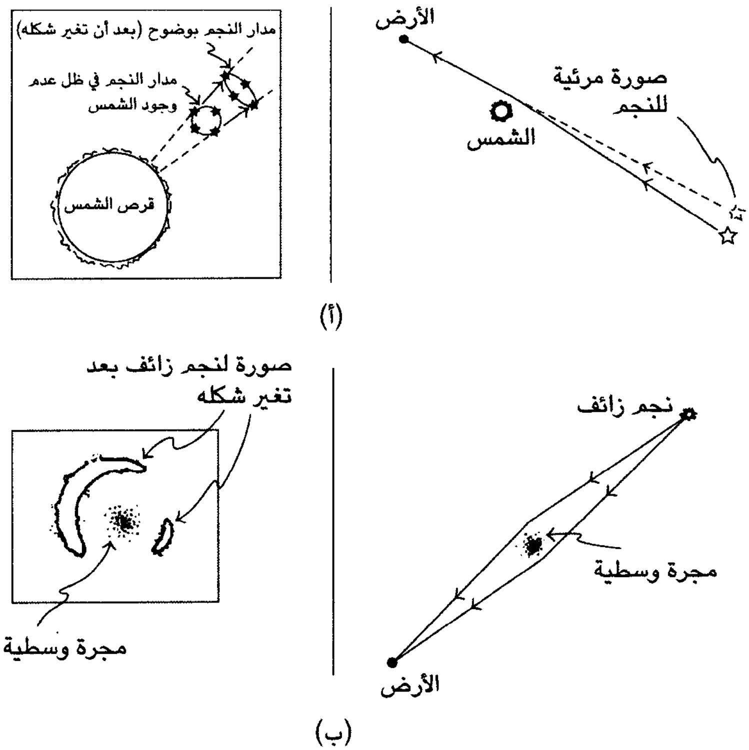
وبهذه الكيفية صاغ أينشتاين نظريته عن الجاذبية؛ إذ عبر عنها من خلال تأثيرات المد والجذر التي تُعد قياسات لمنحنى الزمكان الموضعي، وفي الواقع فإنه من الأهمية بمكان أن نفكر في هذا الأمر من منظور منحنى الزمكان رباعي الأبعاد. ويتضح هذا تخطيطيًّا في الشكل (١-١١)، الذي يوضح كيف يمكننا فعل ذلك من خلال دراسة الخطوط التي تمثل الخطوط العالمية للجسيمات والطرق التي يمكن أن تتغير بها هذه الخطوط كمقاييس لمنحنى الزمكان. ولذلك فإن نظرية أينشتاين بصورةٍ أساسية هي نظرية هندسية للزمكان رباعي الأبعاد، بالإضافة إلى كونها جديرة بالاهتمام على نحو غير تقليدي من الناحية الرياضية.

ينطوي تاريخ اكتشاف أينشتاين لنظرية النسبية العامة على قيمة أخلاقية مهمة، ولقد جرت صياغة هذه النظرية في صورتها النهائية عام ١٩١٥، ولم يكن الحافز لصياغتها أي احتياج للملاحظة، بل كان هذا الحافز ممثلًا في مجموعة من الدوافع الجمالية والهندسية والفيزيائية، وكانت المقومات الرئيسية تتمثل في مبدأ التكافؤ لجاليليو، المشروح بإسقاطه حجرين مختلفي الحجم (انظر شكل ١-١٢)، وأفكار الهندسة اللاإقليدية التي تُعتبر اللغة الطبيعية لوصف منحنى الزمكان. وفي واقع الأمر، لم يكن هناك قدر كبير من الاهتمام بعملية الملاحظة عام ١٩١٥. وبمجرد صياغة نظرية النسبية العامة في صورتها النهائية، كان من المفهوم بوضوح وجود ثلاثة معايير أساسية للملاحظة تتعلق بالنظرية؛ أولًا: ازداد اقتراب مدار كوكب عطارد من نقطة الحضيض[٢] Perihelion، أو بالأحرى تغيرت مسافة

[٢] هي أقرب نقطة يكون فيها الكوكب إلى الشمس، ويتسارع الكوكب في أثناء اقترابه من نقطة الحضيض، وبعدها يبدأ في التباطؤ.

ابتعاده عنها، على نحو لم يكن يوجد له تفسير من خلال تأثير الجاذبية النيوتنية الخاص بالكواكب الأخرى، أما نظرية النسبية العامة فقد كانت تتنبأ بدقة بأية زيادة في مسافة الاقتراب الملحوظ من نقطة الحضيض، بالإضافة إلى ذلك أحدثت الشمس انحناءات في مسارات الأشعة الضوئية، وكان هذا هو السبب وراء إجراء تجربة علمية شهيرة قادها آرثر إدينجتون Arthur Eddington بخصوص حدوث كسوف الشمس عام ١٩١٩، وقد كان ذلك هو المعيار الثاني. وفي الواقع، توصل هذا العالم إلى نتيجة تتفق مع ما تنبأ به أينشتاين، (انظر شكل ١-١٤ القسم أ). وكان المعيار الثالث متمثلًا في توقع سير الساعات بشكل أبطأ عند وضعها في جاذبية محتملة الطاقة؛ بمعنى أن الساعة الأقرب إلى الأرض تسير بشكل أبطأ من ساعة أخرى موضوعة في مكان أعلى، ومن الجدير بالذكر أيضًا أنه يمكن قياس هذا التأثير تجريبيًّا، ومع ذلك فلم تكن هذه المعايير بالغة التأثير على الإطلاق؛ فقد كانت التأثيرات دائمًا طفيفة للغاية ويمكن لنظريات عديدة مختلفة أن تتمخض عنها النتائج نفسها.

جديرٌ بالذكر أن الوضع تغير بشكل هائل عام ١٩٣٣؛ فقد حصل هالس Hulse وتايلور Taylor على جائزة نوبل تقديرًا لهما على إجرائهما سلسلة من الملاحظات غير التقليدية. ويوضح الشكل (١-١٥) القسم (أ) مولد نبضات ثنائيًّا معروف بالرمز PSR 1913 + 16، ويتكون مولد النبضات هذا من زوج من النجوم النيوترونية، يُعتبر كل منهما نجمًا هائل الكثافة ومماثلًا للشمس في كتلتها إلى حدٍّ ما. هذا، إلا أن قطره لا يزيد عن عدة كيلومترات، ويدور النجمان النيوترونيان في مسار حول مركز الجاذبية المشترك بينهما دورانًا بيضاويًّا تامًا، وحريٌّ بالذكر أن لأحدهما مجالًا مغناطيسيًّا قويًّا للغاية تتأرجح فيه الجسيمات دائريًّا وتنشر إشعاعات كثيفة تصل إلى الأرض التي تبعد عنه بنحو ٣٠ ألف سنة ضوئية، حيث يُلاحظ كسلسلة من النبضات الواضحة للغاية، وفي هذا الصدد أُجريت أنواع الملاحظات عالية الدقة كافة لرصد أزمنة وصول هذه النبضات للأرض. وبصفةٍ خاصة يمكن التوصل إلى جميع خصائص مداري النجمين النيوترونيين، بالإضافة

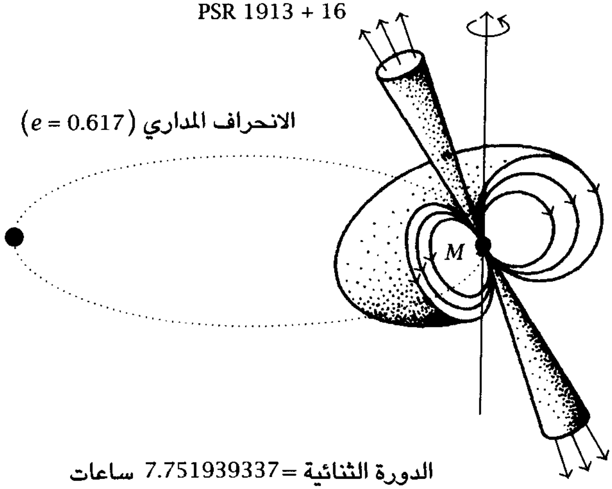


شكل ١-١٤: (أ) تأثيرات مباشرة خاصة بالملاحظة للجاذبية على الضوء طبقًا لنظرية النسبية العامة، وهنا يظهر منحنى الزمكان لويل في صورة تغير شكل مدار كوكب بعيد، وهذا نتيجة تأثير انحناء الضوء الخاص بمجال جاذبية الشمس، ومن ثَمّ يمكن أن يتغير شكل دائري من النجوم ليتخذ شكلًا بيضاويًا. (ب) يمثل تأثير أينشتاين الخاص بانحناء الضوء أداةً مهمة في علم الفلك، ويمكن تقدير كتلة المجرة الوسطية من خلال مدى تسببها في تغيير شكل نجم زائف بعيد.

إلى معرفة جميع التغييرات الدقيقة التي يتعرضان لها عن طريق نظرية النسبية العامة.

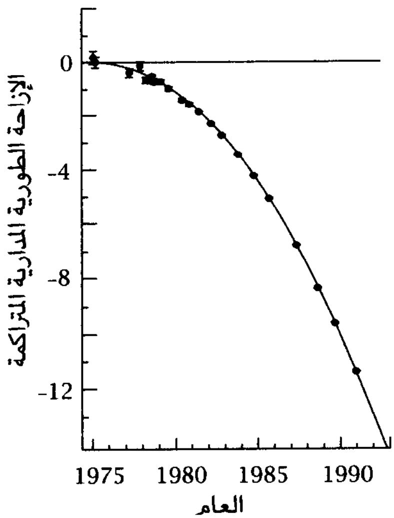
فضلًا عن ذلك، فهناك سمةٌ غاية في الأهمية تتميز بها النسبية العامة فقط — ولا توجد في كل نظريات نيوتن عن الجاذبية — وهي أن الأجسام التي تدور بعضها حول بعض، في مدارات، تشع طاقة في شكل موجات تجاذبية، وتماثل هذه الموجات نظيراتها من الموجات الضوئية، غير أنها تتموج في الزمكان بدلًا من تموجها في المجال الكهرومغناطيسي، وهذه الموجات تأخذ الطاقة بعيدًا عن النظام بمعدل يمكن حسابه بدقة طبقًا لنظرية أينشتاين، إلى جانب هذا فإن معدل فقدان الطاقة لمنظومة النجم النيوتروني المزدوج يتفق بدقة بالغة مع الملاحظات، كما هو موضح في الشكل (١-١٥) القسم (ب) الذي يبين السرعة المدارية لدوران النجمين النيوترونيين، المقيسة على مدى أكثر من عشرين عامًا من الملاحظة، ويمكن توقيت هذه الإشارات بمنتهى الدقة حتى إنه طيلة أكثر من ٢٠ عامًا، ثبت أن الدقة المعروفة عن النظرية تصل إلى درجة من المصداقية تبلغ نحو جزء من 10^{14}، وأدى هذا إلى أن أصبحت النسبية العامة هي أكثر النظريات المختبرة بأقصى درجات الدقة التي عرفها العلم.

في هذا الصدد، نجد أن هناك درسًا مستفادًا غاية في الأهمية، وهو أن دوافع أينشتاين لتخصيص ثماني سنوات أو أكثر من حياته لاستنباط النظرية العامة لم تكن مبنية على الملاحظة أو التجريب، وفي بعض الأحيان، يتعامل الناس مع هذا الأمر على النحو الآتي: «يبحث الفيزيائيون عن النماذج الممكن اتباعها ضمن نتائجهم التجريبية، وعندما يتوصلون إليها يكتشفون نظرية متقنة تتفق وهذه النماذج، وربما يبين هذا سبب تعاون الرياضيات والفيزياء معًا بكفاءة عالية.» لكن في هذه الحالة، لم تكن الأمور على هذه الشاكلة على الإطلاق؛ فقد طُوِّرَت النظرية في الأساس دون أي دوافع قائمة على الملاحظة؛ فإن النظرية الرياضية بالغة الإتقان وهي فيزيائيًّا مبنية على دوافع قوية، والمسألة أن التركيب الرياضي موجود في الطبيعة، ولكنّ النظرية من الناحية الواقعية تُطبق في الفضاء؛ بمعنى أنه لم يفرضها أي



(أ)

شكل ١-١٥(أ): تمثيلٌ تخطيطي لمولد النبضات الثنائي الذي يُرمز له بالرمز PSR 1913+16، ويُعد أحد هذين النجمين النيوترونيين مولد نبضات لاسلكي، وينبعث البث الإشعاعي على طول أقطاب القطبين المغناطيسيين المزدوجين اللذين تعرضا للإزاحة من موضعهما بالنسبة لمحور دوران النجم النيوتروني، ويمكن ملاحظة النبضات بوضوح عند استمرار اندفاع الإشارات اللاسلكية الدقيقة عبر خط الرؤية للمراقب. وفي واقع الأمر، قد أمكن التعرف على خصائص النجمين النيوترونيين من التوقيت بالغ الدقة لأزمنة وصول النبضات باستخدام التأثيرات الموجودة فقط في نظرية النسبية العامة لأينشتاين والتحقق منها.



(ب)

شكل ١-١٥(ب): تغير طور أزمنة وصول النبضات الآتية من مولد النبضات الثنائي PSR 1913 + 16، مقارنةً بالتغير المتوقع نتيجة إطلاق منظومة النجم النيوتروني المزدوج لإشعاع التجاذب.

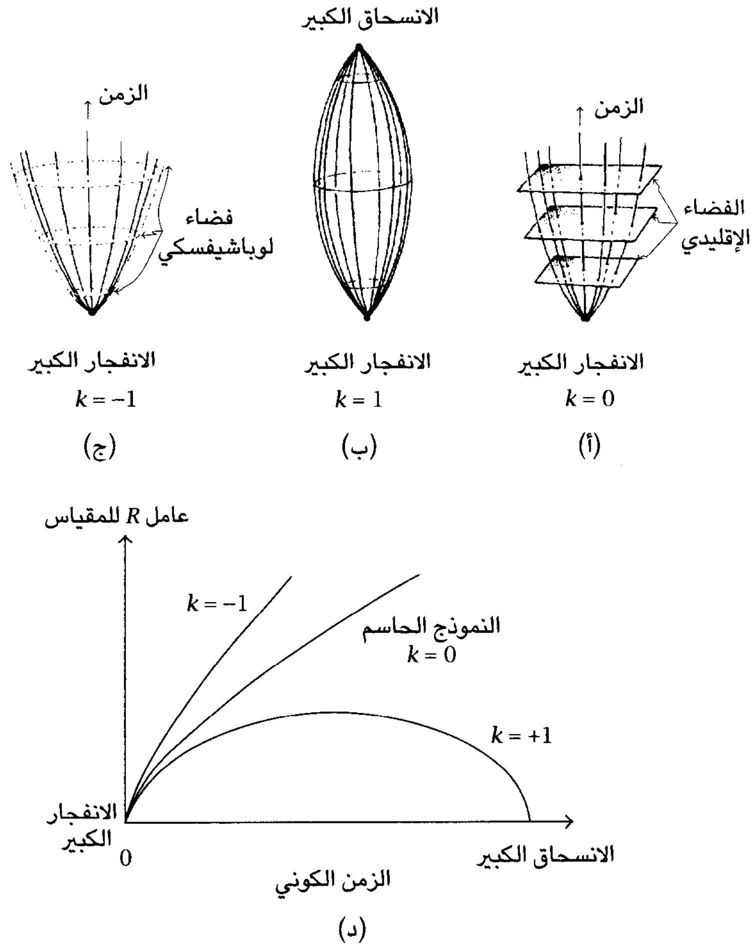
شخص كان على الطبيعة، وهذه إحدى النقاط الأساسية في هذا الفصل؛ لقد كشف أينشتاين النقاب عن شيء كان موجودًا بالفعل، والأكثر من هذا أنَّ ما اكتشفه لم يكن مجرد جزء ثانوي في الفيزياء؛ إنه الشيء الأساسي الأهم الموجود في الطبيعة، وهو طبيعة المكان والزمان.

وبالرجوع إلى الشكل الذي أوردته بصدد العلاقة بين عالم الرياضيات والعالم الفيزيائي (شكل ١-٣)، نقدم الآن موضوعًا غاية في الأهمية: في النسبية العامة نجد أن لدينا نوعًا من التركيب يشكل أساس سلوك العالم الفيزيائي بطريقة دقيقة إلى حدٍّ بعيد، والطريقة التي اكتشفت بها هذه المميزات الأساسية لعالمنا ليست غالبًا متمثلة في ملاحظة الطريقة التي تسلك بها الطبيعة سلوكها، مع أن هذا الأمر بالغ الأهمية بوضوح، ويتعين على

المرء أن يكون مهيأً لأن يطرح بعيدًا النظريات التي ربما تحتكم لكل أنواع الأسباب، لكنها لا تستند إلى الحقائق. لكننا في واقع الأمر بصدد التعامل مع نظرية تتفق تمامًا مع الحقائق بدرجة فائقة من الدقة، وتبلغ دقة هذه النظرية ضعف ما نجده في النظرية النيوتنية، وبعبارةٍ أخرى، تصل درجة المصداقية في النسبية العامة إلى جزء من 10^{14}، ولكن دقة النظرية النيوتنية لا تتجاوز جزءًا من 10^{7}، ويمكن التغلب على هذا الأمر عن طريق مثلًا زيادة نسبة الدقة التي كانت طبقًا لها تُعرف نظرية نيوتن بالمصداقية في الفترة بين القرن السابع عشر وحتى الآن، وفي حقيقة الأمر أعلن نيوتن صحة نظريته بما يُقدر بنحو جزء من الألف، ومن المعروف الآن أن دقتها تصل إلى جزء من 10^{7}.

وبطبيعة الحال، فإن النسبية العامة لأينشتاين مجرد نظرية، ولكن ماذا عن تركيب العالم الفعلي؟ سبق وقلت إن هذا الفصل لن يكون تفصيليًّا، ولو أنني تحدثت عن الكون ككل فبالطبع لن يُسرد الحديث على نحو تفصيلي؛ نظرًا لأنني سوف أضع في الاعتبار الكون على وجه الإجمال. وثمة ثلاثة أنواع للنماذج المعيارية التي تنجم عن نظرية أينشتاين والتي يميزها جميعًا اشتراكها في معامل واحد أشرنا إليه بالحرف k في الشكل (١-١٦)، علاوةً على ما سبق، هناك معامل آخر يظهر أحيانًا في موضوعات النقاش الخاصة بعلم الكون (أو الكوزمولوجي) يُعرف بالثابت الكوني (الكوزمولوجي)، واعتبر أينشتاين إدخاله للثابت الكوني في معادلاته عن النسبية العامة أكبر خطأ ارتكبه على الإطلاق، لذا سوف أنحيه جانبًا وأتجاهل شرحه الآن، وإذا اضطررنا لإعادته إلى ساحة المناقشة فسوف يتعين علينا أن نتعامل معه.

بافتراض أن الثابت الكوني يساوى صفرًا، فإن الحالات الثلاثة للكون، التي وُصِفَت باستخدام الثابت k، يوضحها الشكل (١-١٦)، في هذا الشكل يأخذ المعامل k القيم 1 و0 و1−، لأن جميع الخصائص الأخرى للنماذج استبعدت، وقد يكون من الأفضل أن نتحدث عن عمر أو مقياس الكون، ومن ثَمّ يكون لدينا معامل مستمر، لكن من الناحية الكيفية يمكن اعتبار أن النماذج الثلاثة المختلفة مميزة بمنحنى القطاعات الفراغية للكون؛ إذا كانت



شكل ١-١٦: (أ) صورة الزمكان لكون متمدد بقطاعات فراغية إقليدية (لاحظ وجود بعدين مكانيين). وهنا $k = 0$ (ب) صورة الزمكان لكون متمدد (وبالتالي منكمش) بقطاعات فراغية كروية وهنا $k = +1$ (ج) صورة الزمكان لكون متمدد بقطاعات لوباشيفسكي Lobachevski الفراغية وهنا $k = -1$ (د) ديناميكيات الأنواع الثلاثة المختلفة لنموذج فريدمان Friedman.

القطاعات الفراغية للكون مسطحة فسيكون انحناؤها صفريًّا وسيساوي المعامل k صفرًا (انظر شكل ١-١٦ القسم أ). وإذا كانت القطاعات الفراغية موجبة الانحناء — بمعنى أن يكون الكون منغلقًا على نفسه — فسيكون k مساويًا للقيمة 1+ (انظر الشكل ١-١٦ القسم ب). وفي كل هذه النماذج فإن للكون حالة مبدئية مفردة، وهي حالة الانفجار الكبير Big Bang التي تميز بدء الكون. لكن في حالة $k = +1$ يتمدد الكون إلى أقصى حجم، ثم يعاود الانهيار في حالة يُطلق عليها الانسحاق الكبير Big Crunch. بالإضافة إلى ذلك، لدينا الحالة $k = -1$، وفيها يتمدد الكون إلى الأبد (انظر الشكل ١٦ القسم ج). والحالة $k = 0$ هي الحد المحصور بين الحالتين $k = 1$ و$k = -1$. والجدير بالإشارة إليه أنني قد قمت بتوضيح العلاقة بين نصف القطر والزمن لهذه الحالات الثلاثة للكون في شكل (١-١٦) القسم (د)، وفي هذا الصدد يمكن اعتبار نصف القطر مقياسًا نموذجيًّا في الكون ونستطيع أن نرى أن الحالة $k = +1$ فقط هي التي تؤدي إلى الانسحاق الكبير، ويحدث تمدد غير محدد في الحالتين الأخريين.

في حقيقة الأمر، أود أن أوضح الحالة $k = -1$ بمزيد من التفصيل، وربما كانت تلك هي الحالة الأكثر صعوبة بين الحالات الثلاث السابقة، وثمة سببان وراء الاهتمام بهذه الحالة على نحو خاص؛ السبب الأول: أنه إذا أخذت الملاحظات على الفور كما هي بقيمتها الظاهرية لأصبحت هذه الحالة هي النموذج المفضل، وطبقًا للنسبية العامة، يتحدد انحناء الفراغ بمقدار المادة الموجودة في الكون، لكنّ هذا الأمر لا يبدو كافيًا لإنهاء مناقشة التفاصيل المتعلقة بهندسة الكون، والآن ربما يوجد هناك قدر كبير عن المادة المظلمة dark matter أو المادة المخبأة hidden matter لا نعرف عنه شيئًا، في هذه الحالة، قد يكون الكون واحدًا من النماذج الأخرى. لكن لو لم يكن يوجد مقدار كافٍ من المادة الإضافية، أي أكثر بكثير مما نعتقد أنه لا بد أن يكون موجودًا في الصور البصرية للمجرات، إذن قد يكون الكون على الحالة $k = -1$. والسبب الآخر: هو أنني أفضِّل هذه الحالة شخصيًّا لأقصى حد، لأن خصائص الحالة الهندسية $k = -1$ تُعتبر ممتازة بشكل خاص.

ما الشكل الذي يبدو عليه الكون في الحالة $k = -1$؟ تتخذ قطاعاته الفراغية صورة ما يُعرف باسم الهندسة المطلقة (اللاإقليدية) أو هندسة لوباشيفسكي، وللحصول على صورة لهندسة لوباشيفسكي، من الأفضل النظر إلى إحدى مطبوعات إيشر Escher؛ فقد أعد مجموعةً من المطبوعات التي أطلق عليها اسم حدود الدائرة Circle Limits، وحد الدائرة الرابع Circle Limit 4 هو الموضح في الشكل (١-١٧)، وفي هذا الشكل نجد وصف إيشر للكون، حيث يمكننا أن نرى بوضوح أنه يمتلئ بالملائكة والشياطين! ومن الجدير بالملاحظة أن الصورة تبدو وكأنها مزدحمة للغاية في اتجاه حافة حد الدائرة، ويحدث هذا بسبب رسم هذا التوضيح للفضاء المطلق على سطح ورقة مستوٍ، وبعبارةٍ أخرى، على الفضاء الإقليدي. وما يتعين علينا تصوره أنه من المفترض أن يكون لكل الشياطين الأحجام والأشكال نفسها حتى إذا حدث وعشنا في هذا الكون في اتجاه حافة الشكل فسيبدو شكلهم بالنسبة لنا مماثلًا تمامًا لشكل الآخرين الموجودين في وسط الشكل، بذلك تعطي هذه الصورة انطباعًا عما يحدث في هندسة لوباشيفسكي، فعندما نسير انطلاقًا من المركز في اتجاه الحافة علينا أن نتخيل أن الهندسة الفعلية هناك تماثل تمامًا تلك الموجودة في الوسط، بسبب الطريقة التي تغير فيها شكل الصورة الهندسية، ومن ثَمّ تظل جميع الأشكال الهندسية المحيطة بك على حالها أيًّا كانت الكيفية التي تتحرك بها.

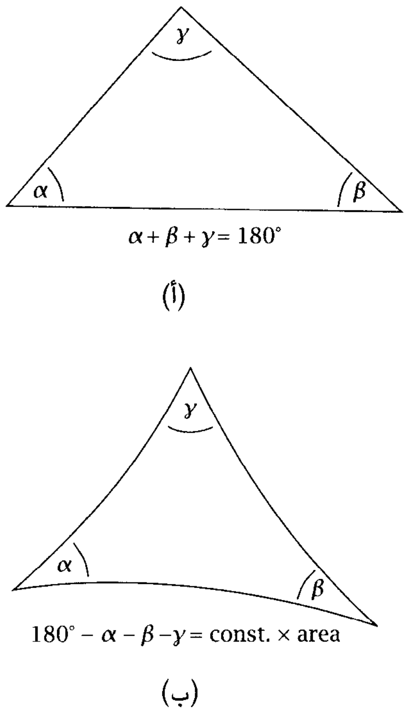
ربما يكون ما سبق أكثر الأمثلة إثارةً للدهشة لهندسة متميزة للغاية، غير أن الهندسة الإقليدية، في طريقة عملها، تُعتبر لافتة للنظر أيضًا، حيث توجد لنا تفسيرًا رائعًا للعلاقة بين الرياضيات والفيزياء، وهذه الهندسة جزءٌ من الرياضيات غير أن اليونانيين فكروا فيها أيضًا باعتبارها وصفًا للطريقة التي يسلك بها العالم سلوكه. وفي الواقع، أصبحت الهندسة وصفًا دقيقًا إلى حدٍّ بعيد للسلوك الفعلي للعالم، ليس لأن نظرية أينشتاين تقول إن الزمكان منحنٍ قليلًا بطرق مختلفة، لكن لأنها وصف دقيق على نحو رائع للعالم نفسه. وقد اعتاد الناس إبداء قلقهم حول إمكانية وجود أنماط أخرى من الهندسة، وبشكل خاص عبّروا عن قلقهم بشأن ما يُعرف باسم



شكل ١-١٧: حد الدائرة الرابع لماوريتس كورنيليس إيشر (توضيح لفضاء لوباشيفسكي).

الفرضية الخامسة لإقليدس. ويمكن إعادة صياغة حديثنا هذا بالصورة التالية: في حالة وجود خط مستقيم في مستوى معين ووجود نقطة خارج هذا الخط المستقيم، إذن يكون هناك توازٍ لهذا الخط من خلال هذه النقطة. اعتاد الناس أن يفكروا في أنه ربما يمكن إثبات هذا عن طريق بديهيات أخرى أكثر وضوحًا خاصة بالهندسة الإقليدية، وبذلك أصبح من الثابت أن هذا غير ممكن، ومن هنا نشأت فكرة الهندسة اللاإقليدية.

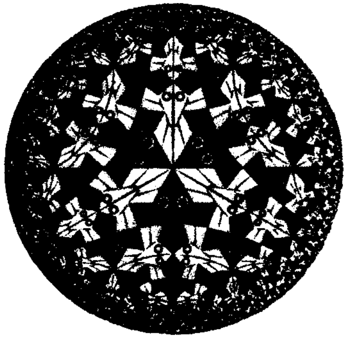
في الهندسة اللاإقليدية، فإن مجموع قياسات زوايا أحد المثلثات لا يكون 180°، وهذا مثالٌ آخر يؤدي بنا للتفكير في أن هذا يبرر زيادة تعقيد الحقائق؛ لأنه طبقًا للهندسة الإقليدية يكون مجموع قياسات زوايا أي مثلث مساويًا لـ 180° (انظر شكل ١-١٨ القسم أ)، لكن في الهندسة اللاإقليدية إذا جعلت مجموع قياسات زوايا أي مثلث أقل من 180° فستجد أن هذا الفرق يتناسب مع مساحة المثلث. وفي الهندسة الإقليدية يُعتبر من الصعوبة بمكان تحديد مساحة المثلث من حيث الزوايا والأطوال، وفي الهندسة اللاإقليدية وهندسة لوباشيفسكي توجد هذه الصيغة البسيطة الرائعة، التي استنتجها لامبير Lambert، والتي تتيح تحديد مساحة المثلث (انظر شكل ١-١٨ القسم ب). في حقيقة الأمر اشتق لامبير هذه الصيغة قبل اكتشاف الهندسة اللاإقليدية ولم أستطع أبدًا فهم ذلك الأمر تمامًا!



شكل ١-١٨: (أ) مثلث في الفضاء الإقليدي (ب) مثلث في فضاء لوباشيفسكي.

إليك الآن موضوعٌ آخر بالغ الأهمية يتعلق بالأعداد الحقيقية Real Numbers التي تُعد أساسية بصورة مطلقة في الهندسة الإقليدية، وقد قُدِّمت الأعداد الحقيقية بشكل أساسي على يد يودوكسس Eudoxus في القرن الرابع قبل الميلاد وما زالت معنا حتى الآن، وهذه الأعداد هي تلك التي تصف الفيزياء في عالمنا ككل، وكما سوف نرى فيما بعد، فثمة حاجة أيضًا للأعداد المركبة Complex Numbers، التي تعتمد على الأعداد الحقيقية.

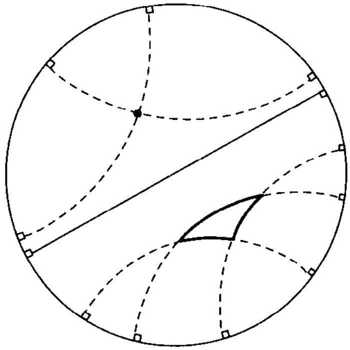
دعنا ننظر الآن إلى صورة أخرى من صور إيشر لنرى كيفية عمل هندسة لوباشيفسكي، وفي هذا الصدد، يُعتبر الشكل (١-١٩) أكثر دقة من الشكل (١-١٧) فيما يتعلق بفهم هذه الهندسة لأن الخطوط المستقيمة



شكل ١-١٩: حد الدائرة الأول لإيشر.

أكثر وضوحًا؛ حيث تُمَثَّل بأقواس دوائر تلتقي مع الحد الفاصل عند زوايا قائمة، لذلك إذا كنت من دارسي هندسة لوباشيفسكي — وكثيرًا ما تتعامل معها — فما ستفكر فيه على أنه خط مستقيم قد يكون واحدًا من هذه الأقواس، ونستطيع أن نرى هذا بوضوح في الشكل (١-١٩)، إذ إن بعضها خطوط مستقيمة إقليدية تمر بمركز الشكل، لكنّ الأخرى أقواس منحنية. والشكل (١-٢٠) يوضح بعض هذه الخطوط المستقيمة؛ في هذا الشكل، ميزت نقطة لا تقع على الخط المستقيم (القطر) الذي يقطع الشكل، ويمكن لمن يتبعون هندسة لوباشيفسكي رسم خطين منفصلين (أو أكثر) يوازيان القطر ويمران بتلك النقطة، كما سبق وأشرت. وهكذا يجري الإخلال بفرضية التوازي في هذه الهندسة، علاوةً على ذلك فإن باستطاعتنا رسم مثلثات واستنتاج مجموع قياسات زوايا المثلثات من أجل التوصل إلى مساحاتها، وربما يعطينا هذا لمحة عن طبيعة الهندسة المطلقة.

والآن، دعوني أقدم لكم مثالًا آخر: سبق وقلت إنني أفضِّل هندسة لوباشيفسكي المطلقة عن غيرها من أنواع الهندسة الأخرى، ومن أسباب ذلك أن مجموعة تماثلاتها symmetries هي نفسها المجموعة التي نتعامل معها فعليًّا، وهي مجموعة لورينتز — وهي مجموعة النسبية الخاصة أو مجموعة تماثل المخاريط الضوئية للنسبية — وللتأكد من هذا الأمر رسمت

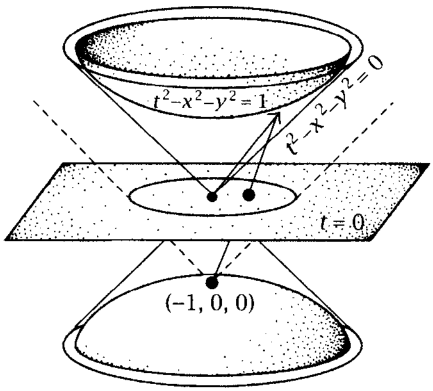


شكل ١-٢٠: جوانب هندسة فضاء لوباشيفسكي (المطلق) موضحة بحد الدائرة الأول.

مخروطًا ضوئيًّا في شكل (١-٢١)، لكن مع بعض الإضافات الطفيفة، وفي هذا الشكل اضطررت لضغط أحد أبعاد المكان من أجل رسمه على مساحة ثلاثية الأبعاد، والمعادلة الآتية تصف المخروط الضوئي الموضح في الشكل:

$$t^2 - x^2 - y^2 = 0.$$

الجدير بالذكر أنه قد تحدد موضع السطحين مجوفي الشكل الموضحين أعلى وأسفل الشكل (١-٢١) عن طريق ما يُطلق عليه وحدة المدى، بدءًا من نقطة الأصل في هندسة مينكوفسكي، (يعني المدى في هندسة مينكوفسكي الزمن؛ أي الزمن الحقيقي المُقاس فيزيائيًّا بواسطة تحرك عقارب الساعة) ولذلك تمثل هذه الأسطح سطح كرة في هندسة مينكوفسكي، واتضح أيضًا أن الهندسة الداخلية للكرة هي بالفعل هندسة لوباشيفسكي (المطلقة). وإذا أخذنا في الاعتبار كرة عادية في الفراغ الإقليدي، نستطيع أن نجعلها تدور حول نفسها، وتصبح مجموعة التماثلات هي تلك الناجمة عن دوران الكرة حول نفسها، وفي هندسة الشكل (١-٢١)، تكون مجموعة التماثلات هي تلك الخاصة بالسطح الموضح في الشكل، وبعبارةٍ أخرى، هي تلك الخاصة بمجموعة لورينتز للدورانات، ومجموعة التماثلات هذه تصف كيف



شكل ١-٢١: فراغ لوباشيفسكي مضمن كقسم مجسم زائدي hyperboloid branch في زمكان مينكوفسكي، وفي هذا الشكل، يحوله الإسقاط الإستريوجرافي إلى قرص بوانكاريه Poincaré disc، الذي تمثل حدوده الدائرة المرسومة على المستوى $t = 0$.

يتحول المكان والزمان عند تثبيت نقطة معينة في الزمكان، ومن ثَمّ تدوير الزمكان حول نفسه بطرق مختلفة، من هذا التوضيح نستطيع أن نرى الآن أن مجموعة تماثلات فراغ لوباشيفسكي هي نفسها مجموعة لورينتز دون أدنى تغيير.

يوضح الشكل (١-٢١) نسخة مينكوفسكي للإسقاط الإستريوجرافي الموضح في شكل (١-١٠) القسم (ج)، ويتمثل العنصر المكافئ للقطب الجنوبي الآن في النقطة $(-1,0,0)$، وقد قمنا في هذا الشكل بإسقاط نقاط من السطح المجوف العلوي إلى السطح المنبسط عند $t = 0$، وهذا السطح هو السطح المناظر للسطح الأفقي الموجود في الشكل (١-١٠) القسم (ج). في هذه الخطوة نجري إسقاط جميع النقاط الموجودة على السطح العلوي على المستوى $t = 0$، وجميع النقاط المسقطة تقع داخل قرص في المستوى $t = 0$، وهذا القرص يُشار إليه أحيانًا باسم قرص بوانكاريه. وهذه بدقة هي الكيفية التي نشأت بها أشكال إيشر لحد الدائرة؛ حيث رُسِمَ سطح

لوباشيفسكي المطلق بالكامل أعلى قرص بوانكاريه، فضلًا عن ذلك، فإن هذا الأمر من شأنه أن يتوصل إلى النتائج نفسها التي توصل إليها الإسقاط الذي حدث في الشكل (١-١٠) القسم (ج)، وذلك من حيث حفاظه على قياسات الزوايا والدوائر، وكل ذلك يمكن توضيحه هندسيًّا على نحو بالغ الدقة. والآن أعتقد أنني قد انحرفت بمناقشتي هذه بعيدًا عن محور تركيزنا، لكنني سأعود على الفور إلى ما بدأت توضيحه.

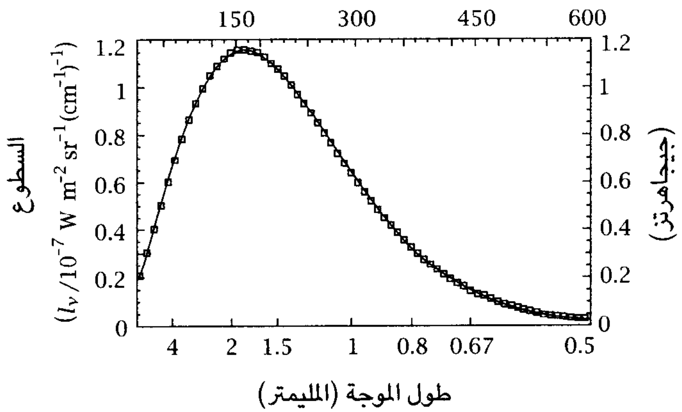
النقطة المثيرة للاهتمام في هذا الأمر أنه، عندما تنساق بعيدًا عن محور التركيز بسبب شيء ما مثل الهندسة سالفة الذكر، يصبح للتحليل والنتائج مميزات خاصة تدعمهما، في حين أن التحليل الذي لا يمتلك هذا التميز الرياضي سرعان ما يتلاشى أثره. وفي الواقع، تتميز الهندسة المطلقة عن غيرها ببعض المميزات على نحو خاص، فقد يكون من الجيد للغاية، على الأقل لمن هم على شاكلتي، إذا كانت بداية الكون مثلًا قد حدثت بتلك الطريقة، وفي هذا الصدد أود أن أذكر أن لدي أسبابًا أخرى عديدة لهذا الاعتقاد، وكثيرٌ من الناس الآخرين لا يحبذون فكرة الكون المطلق المفتوح؛ فإنهم كثيرًا ما يفضلون الأكوان المغلقة المألوفة الساكنة مثل تلك الموضحة في الشكل (١-١٦) القسم (ب). على الجانب الآخر، يفضل كثيرٌ من الناس نماذج العالم المسطح (انظر شكل ١-١٦ القسم أ) بسبب إحدى نظريات الكون المبكر، وهي نظرية التضخمية، التي تقترح أن هندسة الكون لا بد أن تكون مسطحة، وينبغي أن أقول إنني لا أعتقد حقيقةً في صحة هذه النظريات.

تُعرف الأنواع القياسية الثلاثة لنموذج الكون باسم نماذج فريدمان، وتتميز جميعها بحقيقة أنها متماثلة للغاية؛ فهي مبدئيًا نماذج توسعية، لكن في أية لحظة يتخذ الكون شكلًا واحدًا في كل مكان، وقد حدث التوصل لهذا الافتراض كجزء مكمل لتركيب نماذج فريدمان، ويُطلق على هذا الافتراض اسم المبدأ الكوني، وأيًّا كان موقعنا فسيبدو كون فريدمان واحدًا في جميع الاتجاهات، والجدير بالذكر أن كوننا الفعلي يشبه هذا إلى درجة ملحوظة. وإذا كانت معادلات أينشتاين صحيحة — وقد أوضحت أن نظريته تتفق مع الملاحظة إلى حدٍّ بعيد — فليس أمامنا إلا أن نتعامل مع نماذج فريدمان

بأهمية شديدة، وفي مستهل الأمر، أذكر أن جميع هذه النماذج تشترك في ملمح أساسي معروف باسم الانفجار الكبير، حيث كل شيء يؤدى للخطأ منذ البداية. فالكون كثيف إلى ما لانهاية، وساخن إلى ما لانهاية ... وهكذا، مما يعني أن هناك شيئًا ما يؤدى للخطأ في النظرية. وإذا كنت توافق على أن هذه المرحلة الساخنة جدًّا والكثيفة جدًّا قد حدثت بالفعل فستستطيع توقع ما سيكون عليه المحتوى الحراري للكون حاليًا، ومن التوقعات التي تُوُصِّلَ إليها وجود سحابة من إشعاعات الجسم الأسود black body حولنا في كل اتجاه في الوقت الراهن، وعلى وجه الدقة اكتشف هذا النوع من الإشعاع على يد بنزياس Penzias وويلسون Wilson عام ١٩٦٥، وأظهرت أحدث الملاحظات على الإطلاق لِطيف هذا الإشعاع، المعروف باسم إشعاع الخلفية الميكروية الكونية Cosmic Microwave Background Radiation، الذي رُصِدَ بالقمر الصناعي COBE، أن لهذا الإشعاع طيف جسم أسود تتفق قياساته طبقًا للقمر الصناعي COBE مع الطبيعة الحرارية المتوقعة لإشعاع الانفجار الكبير (انظر شكل ١-٢٢).

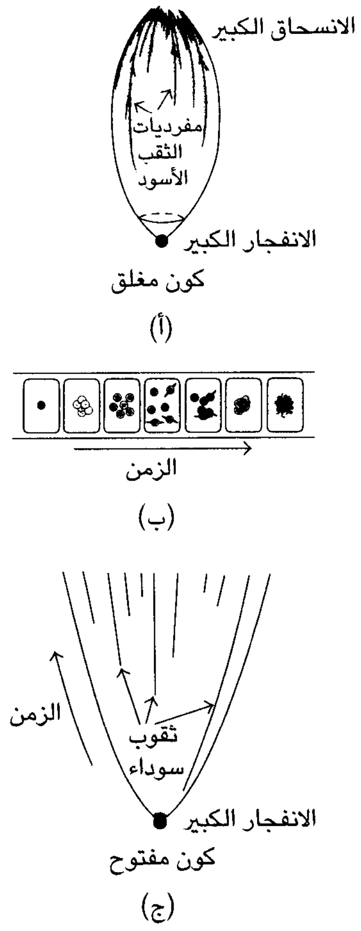
يرى جميع علماء الكون وجود هذا الإشعاع دليلًا على أن كوننا مر بطور ساخن كثيف، ومن ثَمّ يخبرنا هذا الإشعاع عن بعض ملامح طبيعة الكون المبكر؛ فمع أن هذا الإشعاع لا يوضح لنا كل شيء فإنه يخبرنا ببعض الأشياء مثل حدوث الانفجار الكبير، وبعبارةٍ أخرى، لا بد أن الكون كان يشبه كثيرًا النماذج التي يوضحها الشكل (١-١٦).

ثمة اكتشاف مهم آخر للقمر الصناعي COBE يتمثل في أن الكون ليس منتظمًا بشكل كامل، وذلك مع أن إشعاع الخلفية الميكروية الكونية منتظم بدرجة ملحوظة ويمكن تفسير خصائصه بإتقان من الناحية الرياضية؛ فهناك حالات عدم انتظام طفيفة، لكنها حقيقية، في توزيع الإشعاع عبر السماء، وفي حقيقة الأمر، إننا نتوقع ضرورة وجود حالات عدم الانتظام هذه في الكون المبكر، وفي كوننا أيضًا. ومن المحتمل أن يكون الكون مشابهًا للصور الموضحة في الشكل (١-٢٣) الذي يعرض حالتي الكون المفتوح والمغلق.



شكل ١-٢٢: التطابق الدقيق بين قياسات القمر الصناعي COBE لِطيف إشعاع الخلفية الميكروية الكونية والطبيعة الحرارية المتوقعة لإشعاع الانفجار الكبير.

في الكون المغلق، تتطور حالات عدم الانتظام لتشكل تكوينات حقيقية ملحوظة — مثل النجوم والمجرات ... وهكذا — وبعد فترة تتشكل ثقوب سوداء عن طريق انهيار النجوم، وذلك عن طريق تراكم الكتلة في مراكز المجرات وهكذا، ويكون لكل هذه الثقوب السوداء مراكز مفردة، تشبه كثيرًا الانفجار الكبير، ولكن عكسيًّا، ومع ذلك فإن الأمر ليس على هذه الدرجة من البساطة. وطبقًا للصورة التي أوضحناها، فإن الانفجار الكبير الأولي كان بمنزلة حالة منتظمة ومتماثلة، غير أن نقطة النهاية للنموذج المغلق توحي بحالة من الفوضى العارمة؛ حيث تتجمع الثقوب السوداء كافة في النهاية معًا لينجم عن ذلك عدم انتظام مهول عند الانسحاق الكبير النهائي (انظر شكل ١-٢٣ القسم أ). ويوضح الشكل (١-٢٣) القسم (ب) تطور هذا النموذج المغلق تخطيطيًّا من خلال شريط مصور. وفي حالة نموذج الكون المفتوح، لا تزال الثقوب السوداء تتشكل، ولا تزال هناك مفردية Singularity أولية، وتتشكل المفرديات في مراكز الثقوب السوداء (انظر شكل ١-٢٣ القسم ج).

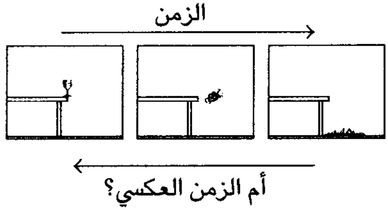


شكل ١-٢٣: (أ) تطور نموذج عالم مغلق في ظل اقتراب وصول الثقوب السوداء black holes، كأجسام لأنواع متباينة، إلى آخر مراحل تطورها، ويمكن ملاحظة أنه من المتوقع حدوث فوضى عارمة في أثناء مرحلة الانسحاق الكبير. وتتابع الأحداث هذا المعروض في القسم (أ) موضحٌ أيضًا كشريط مصور في القسم (ب). أما القسم (ج)، فيوضح تطور نموذج كون مفتوح ويعرض من ثم تكوين الثقوب السوداء في أزمان مختلفة.

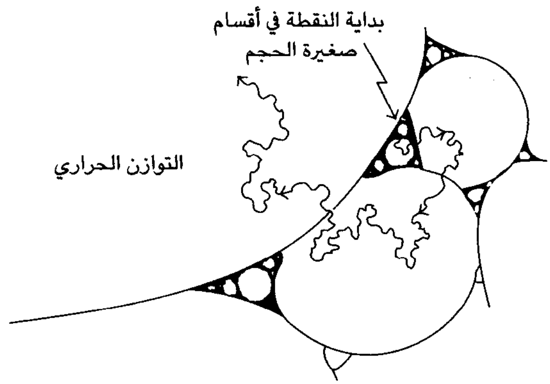
في حقيقة الأمر، إنني أركز على هذه السمات لنماذج فريدمان القياسية لأظهر أن هناك اختلافًا كبيرًا بين ما يبدو أننا نراه في الحالة المبدئية وما نتوقع أن نجده في المستقبل البعيد، وهذا الأمر يرتبط بالقانون الأساسي للفيزياء المعروف باسم القانون الثاني للديناميكا الحرارية.

وحريٌّ بالذكر أن باستطاعتنا فهم هذا القانون باستخدام لغة بسيطة غير معقدة: لنتخيل معًا زجاجة نبيذ موضوعة على حافة طاولة، فربما تسقط هذه الزجاجة من على الطاولة وتتحطم إلى شظايا ويسيل النبيذ على السجادة بأكملها (شكل ١-٢٤). ومما لا شك فيه أنه لا يوجد في الفيزياء النيوتنية شيءٌ يقول إن العملية العكسية غير ممكنة الحدوث، ومع ذلك، فلا يُلاحظ هذا الأمر على الإطلاق؛ فمن الطبيعي أنك لم تر مطلقًا زجاجات نبيذ تعيد تجميع نفسها بنفسها بعد أن سقطت على الأرض أو رأيت النبيذ وهو يصعد مجددًا إلى الزجاجات التي جمعت نفسها. وفيما يتعلق بقوانين الفيزياء التفصيلية فإن أي اتجاه زمني يتساوى تمامًا مع الاتجاه الآخر، ولنفهم هذا الفرق، نحتاج إلى القانون الثاني في الديناميكا الحرارية الذي يقول لنا إن القصور الحراري للنظام (أو الإنتروبيا entropy) يتزايد بمرور الوقت، فيقل قدر القصور الحراري عندما تكون الزجاجة على المائدة مقارنةً بها عندما تقع على الأرض، وطبقًا للقانون الثاني للديناميكا الحرارية، فقد ازداد القصور الحراري للنظام، وعلى وجه التقريب، يمكن أن نقول إن القصور الحراري هو مقياس لاضطراب أي نظام، وللتعبير عن هذا المفهوم بدقة أكثر، يتعين علينا الاستعانة بمفهوم الحيز الطوري phase space.

يُعد الحيز الطوري حيزًا بوسعه استيعاب عدد هائل من الأبعاد وكل نقطة من نقاط هذا الحيز متعدد الأبعاد تصف مواضع وعزم جميع الجسيمات التي تشكل النظام موضع الاعتبار، وفي الشكل (١-٢٥)، اخترنا نقطة معينة في هذا الحيز الطوري الضخم الذي يوضح المواضع التي اتخذتها جميع الجسيمات وكيفية تحركها، ومع تطور منظومة الجسيمات، تتحرك النقطة إلى موضع آخر في الحيز الطوري، وقد قمت بتوضيحها وهي تتحرك متذبذبة من نقطة في الحيز الطوري إلى نقطة أخرى.



شكل ١-٢٤: تُعتبر قوانين الميكانيكا انعكاسية بالنسبة للزمن، ولكنّ الترتيب الزمني لمشهد كهذا من الإطار الأيمن إلى الإطار الأيسر أمرٌ لم يتحقق تجريبيًّا بعد، أما من الإطار الأيسر إلى الأيمن فأمرٌ معتاد.

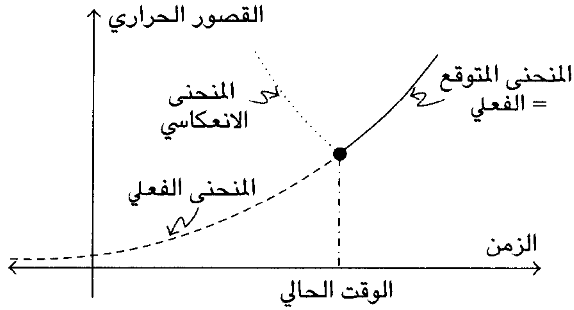


شكل ١-٢٥: تطبيق القانون الثاني للديناميكا الحرارية: مع مرور الزمن، تدخل نقطة الحيز الطوري إلى أقسام ذات أحجام أكبر، فيزداد القصور الحراري على نحو متواصل.

يمثل الخط المنحني في الشكل (١-٢٥) التطور المعتاد لمنظومة الجسيمات، ولا يشتمل الشكل حتى الآن على قصور حراري، ولجعل الشكل مشتملًا على قصور حراري يتعين علينا رسم دوائر صغيرة ناتجة عن تجميع الحالات المختلفة معًا التي لا تستطيع أن تدرك أنها مختلفة. قد يبدو هذا مبهمًا بعض الشيء؛ فماذا تعتقد أنني أقصد بقول إنك لا

تستطيع أن تدرك أنها مختلفة؟ بالتأكيد، يعتمد هذا على من تكون وعلى مدى دقتك. حسنًا، يُعد تحديد ما نقصده بالقصور الحراري نفسه من الأمور الخادعة إلى حدٍّ ما في الفيزياء النظرية. في الواقع، إن تحديد المقصود بالقصور الحراري يأتي بإجراء الخطوات التالية: أولًا: يتعين علينا تجميع الحالات معًا طبقًا لمفهوم الأشياء التي لا تستطيع أن تدرك أنها مختلفة، فما عليك القيام به هو أخذ كل الأشياء الواقعة في هذا الجزء من الحيز الطوري وجمعها معًا، ثم النظر إلى حجم هذا الجزء واستنباط لوغاريتم الحجم وضربه في الثابت المعروف باسم ثابت بولتزمان Boltzmann's constant، وفي النهاية نحصل على القصور الحراري، ويقول لنا القانون الثاني للديناميكا الحرارية إن القصور الحراري يزداد، ويقول أيضًا إنه إذا بدأت المنظومة عملها في نطاق مكاني صغير وأتيحت لها الفرصة لأن تتطور، فإنها تنتقل إلى نطاقات أكبر فأكبر، ومن المحتمل جدًّا أن يتمثل سبب حدوث هذا — إذا ما نظرنا إلى هذه المسألة بإمعان — في أن النطاقات الأكبر تغدو أضخم على نحو هائل بشكل مطلق مقارنةً بالنطاقات الصغيرة المجاورة. لذلك إذا وجدت نفسك في أحد هذه النطاقات الكبيرة، فاعلم أنه لا توجد أية فرصة فعلية على الإطلاق للعودة إلى نطاق أصغر، وهذا هو السبب وراء حدوث كل ذلك؛ فمنظومة الجسيمات تتجول في الحيز الطوري وتنتقل إلى نطاقات أكبر وأكبر، وهذا بالفعل هو ما يقوله لنا القانون الثاني.

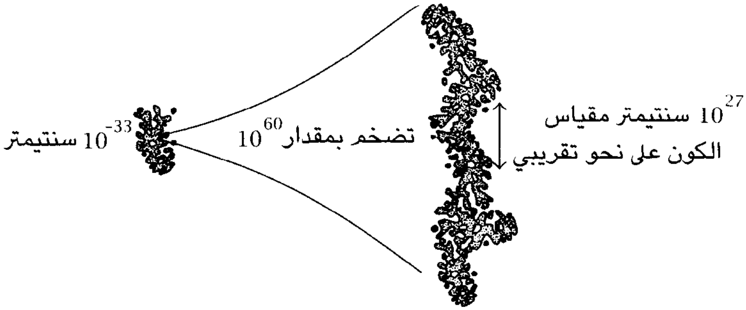
في حقيقة الأمر، كان ما سبق مجرد نصف التوضيح، ويوحي هذا التوضيح بأنه إذا كنا نعرف حالة المنظومة الآن، إذن نستطيع أن نتوقع أكثر حالاتها احتمالًا في المستقبل. على النقيض من ذلك، نجد أن هذا التوضيح يقدم لنا الحل الخطأ إذا حاولنا استخدام طريقة المعالجة نفسها ولكن بطريقة عكسية. لنفترض أن الزجاجة موجودة على حافة المنضدة الآن؛ لذا يمكن أن نتساءل عن الأسلوب الأكثر احتمالًا الذي اتُّبِعَ كي تصبح في مكانها هذا. إذا استخدمنا طريقة المعالجة التي سبق لنا توضيحها، ولكن على نحو عكسي، نستنتج أن الشيء الأكثر احتمالًا يتمثل في أن الأمر بدأ



شكل ١-٢٦: إذا استخدمنا طريقة المعالجة الموضحة في شكل (١-٢٥) ولكن بالاتجاه الزمني المعاكس، نستطيع توقع ما حدث في الماضي وهو أن القصور الحراري كان قد ازداد في الماضي أيضًا عن قيمته الآن، وهذا بالطبع يختلف اختلافًا مهولًا عن النتائج المستقاة من الملاحظة.

بفوضى عارمة على السجادة. بعد ذلك، جمعت الزجاجة نفسها على المنضدة. وهذا بوضوح ليس هو التفسير الصحيح؛ فالتفسير الصحيح يتمثل في أن شخصًا ما وضعها هناك، وذلك الشخص وضعها هناك لسبب ما، وهذا بدوره كان نتيجة سبب ما آخر وهكذا، ومن ثَمَّ تظل سلسلة الأسباب تعود شيئًا فشيئًا إلى الوراء، إلى حالات قصور حراري أقل فأقل في الماضي. ويكون المنحنى الفيزيائي الصحيح هو المنحنى «الفعلي» الموضح في الشكل (١-٢٦) — وليس المنحنى «الانعكاسي» — ويستمر القصور الحراري في النقصان التدريجي في الماضي.

حريٌّ بالذكر أن أسباب ازدياد معدل القصور الحراري في المستقبل شُرِحَت عن طريق الانتقال إلى نطاقات أكبر، أمّا أسباب نقص المعدل في الماضي فهو أمر مختلف تمامًا. يدفعنا ذلك إلى الاعتقاد في ضرورة وجود شيء ما أدى إلى حدوث ذلك في الماضي، تُرى ما الذي أدى لذلك؟ نجيب عن هذا السؤال بأننا كلما اتجهنا للماضي قلّ معدل القصور الحراري إلى أن ينتهي الأمر بالانفجار الكبير.



شكل ١-٢٧: توضيحٌ لمسألة تضخم عدم الانتظام الشامل في الكون المبكر.

لا بد أن ثمة شيئًا ما مميزًا جدًّا للانفجار الكبير، لكنّ تحديد ماهية هذا الشيء من الموضوعات المثيرة للجدل. ومن النظريات الشائعة التي عالجت هذا الموضوع — صرحت مسبقًا بأنني لا أعتقد في صحتها مع أن عددًا كبيرًا من الناس يهتمون بها إلى حد بعيد — فكرة الكون التضخمي، وتتمثل هذه الفكرة في أن الكون على درجة كبيرة من الانتظام من منظور واسع بسبب شيءٍ كان من المفترض حدوثه في الأطوار المبكرة جدًّا لتوسع الكون. وافترض أنه قد حدث توسع هائل على نحو مطلق عندما كان عمر الكون تقريبًا 10^{-36} من الثانية. والفكرة هي أنه ليس من المهم الصورة التي كان عليها الكون في هذه المراحل المبكرة جدًّا. فإذا كان من الممكن توسعه بعامل هائل يبلغ نحو 10^{60}، إذن سيبدو مسطحًا. وفي واقع الأمر، يُعد هذا أحد أسباب تفضيل هؤلاء الناس لفكرة الكون المسطح.

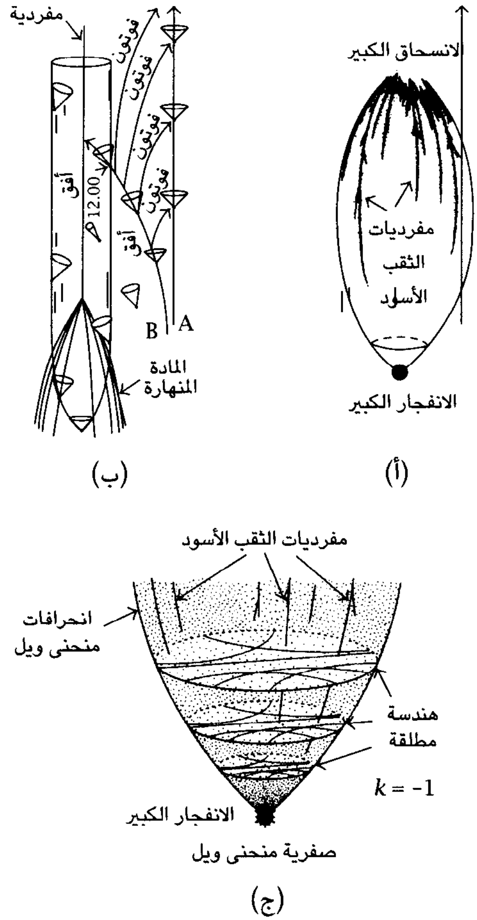
لكن كما نرى، لم تقدم طريقة المعالجة هذه ما كان من المفترض أن تقدمه، فما نتوقعه في هذه الحالة المبدئية — إذا كانت قد اخْتيرت عشوائيًّا — هو الفوضى العارمة. وإذا قمنا بزيادة تلك الفوضى باستخدام هذا العامل الهائل، فسوف يظل الوضع كما هو؛ فوضى كاملة. وفي واقع الأمر، كلما زاد الاتساع بدا الحال أسوأ (شكل ١-٢٧).

لذلك، فإن المعالجة في حد ذاتها لا تفسر سبب الانتظام البالغ للكون. فنحن في حاجة إلى نظرية تسرد لنا ماهية الانفجار الكبير. ومع أننا لا

نعرف ماهية هذه النظرية فإننا نعلم أنها ينبغي أن تتضمن عملية دمج لفيزياء العالم من المنظورين الواسع والضيق معًا. فلا بد أن تكون مشتملة على فيزياء الكم بقدر اشتمالها على الفيزياء الكلاسيكية. بالإضافة إلى ذلك، أقول إنه يجب أن يكون من ضمن ما تسرده النظرية حقيقة أن الانفجار الكبير كان على قدر الانتظام نفسه الذي نعتقد أنه كان عليه. وربما تسفر نظرية كهذه عن كون لوباشيفسكي مطلق، شبيه بالوضع الذي أفضله، لكنني لن أصر على ذلك.

لنعد الآن مرةً أخرى إلى موضوع الكون المغلق والكون المفتوح (انظر شكل ١-٢٨). في هذا الشكل أيضًا، حرصت على تقديم صورة عن تكوين ثقب أسود، الأمر الذي يعرفه الخبراء تمام المعرفة. وفي حقيقة الأمر، ينتج عن انهيار المادة داخل أي ثقب أسود تكوين مفردية، وهذا هو ما تمثله الخطوط الداكنة في مخططات الزمكان للكون. وفي هذا الصدد أريد تقديم فرضية أطلقت عليها اسم فرضية منحنى ويل Weyl curvature hypothesis. وفي الواقع لا تشتمل أية نظرية معروفة على هذه الفرضية. وكما سبق وأوضحت، فإننا لا نعلم ماهية النظرية لأننا لا نعرف كيفية دمج فيزياء العالم من منظور واسع بفيزياء العالم من منظور ضيق. وعندما يحدث ونكتشف تلك النظرية، فإنها لا بد وأن يكون من نتائجها هذه السمة التي أطلقت عليها اسم فرضية منحنى ويل. وتذكر أن منحنى ويل هو ذلك الجزء الصغير من تنسور ريمان الذي يتسبب في حدوث الانحرافات وتأثيرات المد والجزر. ولسببٍ ما لا نفهمه حتى الآن، فإنه في نطاق الانفجار الكبير، لا بد أن يسفر الدمج المناسب بين النظريات عن بلوغ تنسور ويل القيمة صفر، أو بالأحرى انحصاره في نطاق قيمة صغيرة للغاية.

قد ينتج عما سبق كون مثل ذلك الموضح في شكل (١-٢٨) القسم (أ) أو (ج)، لكنه ليس شبيهًا بالكون الموضح في الشكل (١-٢٩). والجدير بالذكر أن فرضية منحنى ويل تتميز بأنها لا تماثلية زمنيًّا ولا تُطبق إلا على مفرديات الماضي وليس على مفرديات المستقبل. وإذا كانت المرونة نفسها الخاصة بالسماح لتنسور ويل بأن يكون عامًّا، التي طبقتها بعد ذلك، قد



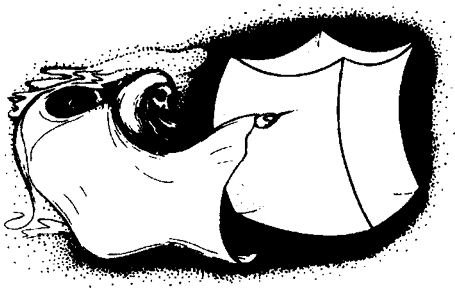
شكل ١-٢٨: (أ) التاريخ الكامل لكون مغلق يبدأ بانفجار كبير منتظم مشتمل على قصور حراري منخفض وبمنحنى ويل مساوٍ للصفر، وينتهي بانسحاق كبير يتضمن قصورًا حراريًّا متزايدًا — دليلًا على تجمد ثقوب سوداء عديدة — وبقيمة لانهائية لمنحنى ويل (∞). (ب) مخطط زمكان يوضح حالة انهيار إلى ثقب أسود واحد. (ج) تاريخ كون مفتوح، يبدأ بانفجار كبير منتظم مشتمل على قصور حراري منخفض وبمنحنى ويل مساوٍ للصفر.



شكل ١-٢٩: في حالة استبعاد فرض صفرية منحنى ويل، فسيصبح لدينا انفجار كبير مشتمل على قصور حراري متزايد، حيث ويل يساوي ∞. وسيعج هذا الكون بأعداد مهولة من الثقوب البيضاء، إلى جانب عدم إمكانية تطبيق القانون الثاني للديناميكا الحرارية، وهو أمرٌ يتعارض كليةً مع التجربة.

طُبقت على الكون في الماضي، في نموذج الكون المغلق، فكان يمكن أن ينتهي الأمر بكون تسوده الفوضى العارمة في الماضي كما هي الحال في المستقبل (انظر شكل ١-٢٩). ولكن لا يبدو ذلك شبيهًا بأية حال من الأحوال بالكون الذي نعيش فيه.

وهنا أود أن أطرح سؤالًا مهمًّا للغاية في هذا الصدد: ما التقدير العشوائي لاحتمالية أن يكون الكون قد اتخذ في بداياته شكل المفردية، حتى وإن كانت احتمالية ضعيفة كما هي الحال بالفعل؟ تُقدر هذه الاحتمالية بأقل من جزء واحد من $(10^{10})^{123}$. كيف أمكن التوصل لهذا التقدير؟ من خلال صيغة رياضية وضعها جاكوب بكنشتاين Jacob Beckenstein وستيفين هوكنج Stephen Hawking تتعلق بالقصور الحراري للثقب الأسود. وإذا طبقنا هذه الصيغة الرياضية على هذا السياق، فإننا سنحصل



شكل ١-٣٠: يبلغ حجم النقطة المحددة في الحيز الطوري التي تطور منها الكون قرابة $1/10^{10^{123}}$ من الحجم الكلي.

على الإجابة الهائلة التي تقول إن الأمر برمته يعتمد على حجم الكون. وإذا وضعنا حالة الكون الذي أفضله شخصيًّا في الاعتبار، فإن التقدير الرقمي للاحتمالية، في الواقع، سيبلغ ما لانهاية.

ماذا يوضح ذلك عن الدقة المتضمنة في عملية الانفجار الكبير دون أدنى شك؟ إنها دقة متناهية للغاية، وقد أوضحت ذلك بالرسم في الشكل (١-٣٠)، الذي يعرض محاولة إيجاد نقطة صغيرة للغاية في الحيز الطوري تمثل الظروف الأولية التي لا بد وأن الكون قد تطور منها إذا كان يشبه الكون الذي نعيش فيه إلى حدٍّ ما. ولإيجاد هذه النقطة طبقًا للشكل، فإنه يتعين أن يُحَدَّد موقعها في الحيز الطوري بدقة تبلغ جزءًا واحدًا من $(10^{10})^{123}$. وإذا كان من المستطاع وضع صفر واحد بجانب كل جسيم أولي في الكون، فسأظل لا أستطيع كتابة العدد بالكامل، حيث إنه عدد مذهل.

لقد تحدثنا في هذا الفصل عن الدقة البالغة التي تتوافق بها الرياضيات مع الفيزياء. وتحدثنا أيضًا عن القانون الثاني للديناميكا الحرارية، الذي يُعتقد فيه على الأحرى أنه قانون غير قائم على أسس علمية — حيث إنه معنيٌّ بالعشوائية والصدفة — ولكنه يتميز بدقة بالغة كامنة في ثناياه. وفي حال تطبيقه على الكون، فإن لهذا القانون إسهامًا في الدقة التي تأسست بها حالته الأولية. وينبغي لهذه الدقة أن تكون هي الأداة المُستخدمة لدمج نظرية الكم مع نظرية النسبية العامة في نظرية واحدة، لم نتوصل إليها

حتى الآن. لذلك فإنني في الفصل التالي سأطرح للمناقشة بإيجاز المقومات المفترض تضمينها في نظرية كهذه.

الفصل الثاني

ألغاز فيزياء الكم

في الفصل الأول أوضحت أن تركيب العالَم الفيزيائي يعتمد بدقة بالغة على الرياضيات، كما هو موضح رمزيًّا في الشكل (١-٣). وباستطاعتك معرفة مدى دقة الرياضيات البالغة من خلال وصف أكثر جوانب الفيزياء أهميةً. وفي محاضرة شهيرة عام ١٩٦٠، أشار يوجين فاجنر Eugene Wigner إلى هذا الأمر على النحو الآتي:

«التأثير اللامعقول للرياضيات في العلوم الفيزيائية»

وفيما يأتي سردٌ لقائمة الإنجازات المؤثرة:

الهندسة الإقليدية: تصل نسبة دقتها إلى ما هو أصغر من عرض ذرة الهيدروجين على مدى متر واحد. وكما نوقش في المحاضرة الأولى، لا تُعتبر الهندسة الإقليدية دقيقة تمامًا بسبب تأثيرات النسبية العامة، ومع ذلك، فإنه لمعظم الأغراض العملية، تتميز الهندسة الإقليدية بدقة بالغة حقًّا.

الميكانيكا النيوتنية: من المعلوم أن درجة دقتها تصل إلى نحو جزء واحد من 10^7، لكنها ليست دقيقة للغاية، ومرةً أخرى، فنحن في حاجة إلى النسبية للحصول على نتائج أكثر دقة.

كهروديناميكا ماكسويل: تثبت دقتها على نحو جيد على عدد كبير من المقاييس، بدايةً من أحجام الجسيمات الدقيقة عند تناولها فيما يتعلق

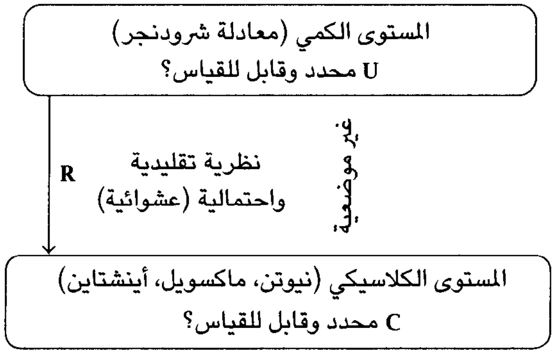
بصلتها بميكانيكا الكم، حتى أحجام المجرات البعيدة التي تُقدر بمقاييس تبلغ نحو 10^{35} أو أكثر.

نسبية أينشتاين: كما نوقش في الفصل الأول، يمكن القول إنها دقيقة إلى نحو جزء واحد من 10^{14}، وهو تقريبًا ضعف الرقم في الميكانيكا النيوتنية، المعتمدة على نظرية أينشتاين.

ميكانيكا الكم: هي موضوع هذا الفصل كما تُعتبر أيضًا نظرية دقيقة إلى حد بعيد. وفي نظرية المجال الكمي quantum field theory، التي هي اتحاد ميكانيكا الكم بكهروديناميكا ماكسويل والنظرية النسبية الخاصة لأينشتاين، توجد تأثيرات تصل درجة دقتها إلى نحو جزء من 10^{11}. وخاصةً في مجموعة الوحدات المعروفة باسم وحدات ديراك Dirac units، يُتوقع أن يصل العزم المغناطيسي للإلكترون إلى 1.001159652(46)، مقارنةً بالقيمة المقدَّرة تجريبيًّا وهي 1.0011596521(93).

ثمة نقطة مهمة تتعلق بهذه النظريات، تتمثل في أن الرياضيات ليست فقط مؤثرة ودقيقة إلى حد بعيد في وصفها للعالم الفيزيائي الذي نعيش فيه، بل إنها أيضًا مثمرة للغاية كرياضيات في حد ذاتها. وفي الأغلب الأعم، نجد أن بعض المفاهيم الأكثر فائدةً في الرياضيات تعتمد على مفاهيم مشتقة من النظريات الفيزيائية. وفيما يأتي، نورد بعض الأمثلة لأنواع الرياضيات التي كان الحافز وراءها متطلبات النظريات الفيزيائية:

- الأعداد الحقيقية
- الهندسة الإقليدية
- حساب التفاضل والتكامل والمعادلات التفاضلية
- هندسة بينية التنامي أو هندسة السمبلكتك symplectic geometry
- الصيغ التفاضلية والمعادلات التفاضلية الجزئية
- هندسة ريمان وهندسة مينكوفسكي



شكل ٢-١

- الأعداد المركبة
- فضاء هيلبرت Hilbert space
- تكامل الدوال ... إلخ

وكان من أكثر الأمثلة اللافتة للنظر اكتشاف حساب التفاضل والتكامل، الذي طوره نيوتن مع آخرين لتوفير الأسس الرياضية لما نطلق عليه الآن الميكانيكا النيوتنية. وعندما كانت تطبق هذه الأنواع المتباينة من الرياضيات فيما بعد على حل المسائل الرياضية البحتة، فقد أثبتت أيضًا أنها ذات فائدة قصوى بوصفها رياضيات في حد ذاتها.

في الفصل الأول، كان محور اهتمامنا متمثلًا في مقاييس الأجسام، بدءًا بطول بلانك وزمن بلانك — وهما الوحدتان الأساسيتان للطول والزمن — مرورًا بالأحجام الأصغر التي تصف فيزياء الجسيمات الزائد حجمها بمقدار 10^{20} ضعف عن مقياس بلانك، لنصل إلى مقياسي الطول والزمن للإنسان — وبذلك نوضح أننا أجسام مستقرة لحد بعيد في الكون — وختامًا بعمر الكون الفيزيائي ونصف قطره. وفي وصفنا للفيزياء الأساسية، ذكرتُ الحقيقة المثيرة المزعجة المتمثلة في أننا نستخدم أسلوبين مختلفين تمامًا لوصف العالم، اعتمادًا على حديثنا عن نهاية الأشياء هل سيكون من منظور واسع أو من منظور ضيق. والشكل (٢-١)، وهو نسخة

طبق الأصل للشكل (١-٥)، يوضح أننا نستخدم ميكانيكا الكم لوصف مستوى النشاط الكمي الصغير، ونستخدم الفيزياء الكلاسيكية لوصف الظواهر على نطاق واسع. وقد أشرت لمستويي النشاط هذين باستخدام حرف U عند المستوى الكمي، للتعبير عن وحدة النشاط الكمي Unitary، وC للإشارة إلى المستوى الكلاسيكي. وقد سبق وناقشت الفيزياء من منظور واسع في الفصل الأول مؤكدًا أن لدينا قوانين مختلفة تمامًا على نطاقي العالم الواسع والضيق. لآخر وهما يسقطان معًا، ست وفي اعتقادي أن وجهة نظر أغلب الفيزيائيين هي أنه إذا كنا قد فهمنا فيزياء الكم على نحو مناسب حقًّا، فسيصبح باستطاعتنا استنتاج الفيزياء الكلاسيكية منها. من ناحية أخرى، أريد أن أعالج الأمر بصورة مختلفة، ولا نستطيع أن نفعل ذلك عمليًّا؛ فنحن إما نستخدم المستوى الكلاسيكي أو المستوى الكمي، وهذا الوضع يشبه إلى حد بعيد الطريقة التي كان اليونانيون القدماء ينظرون بها إلى العالم. فمن وجهة نظرهم، هناك فئة واحدة من القوانين تُطبَّق على الكرة الأرضية، وفئة مختلفة من القوانين تُطبَّق على السماء. وكانت قوة وجهة نظر جاليليو ونيوتن هي التي أتاحت لنا أن نجعل هاتين الفئتين من القوانين تعملان معًا وأن نرى أنه يمكن فهمهما عن طريق الفيزياء نفسها. ويبدو الآن أننا نعود إلى الوراء إلى موقف مشابه لليونانيين، في ظل وجود فئة واحدة من القوانين تُطبَّق على المستوى الكمي وفئة أخرى للمستوى الكلاسيكي.

ثمة احتمال واحد لسوء الفهم يتعين عليّ أن أوضحه فيما يتعلق بالشكل (٢-١). لقد وضعت أسماء نيوتن وماكسويل وأينشتاين داخل الإطار المعنْون بـ«المستوى الكلاسيكي»، بالإضافة إلى كلمة «حتمي». وأنا لا أقصد أنهم كانوا يعتقدون، على سبيل المثال، أن الطريقة التي يسلكها العالم طريقة حتمية. فمن المنطقي تمامًا افتراض أن نيوتن وماكسويل لم يمتلكا هذه الرؤية، مع أنها كانت لدى أينشتاين. وتشير الكلمتان «حتمي» و«قابل للقياس» إلى نظرياتهم فقط وليس إلى ما كان يعتقده العلماء حول العالم الواقعي. وفي الإطار المعنْون بـ«المستوى الكمي»، عمدت إلى تضمين

الكلمتين «معادلة شرودنجر» وأنا على يقين أن شرودنجر لم يكن يعتقد أن الفيزياء بأكملها توصف بالمعادلة التي نُسبت إليه، وسوف أعود إلى هذه النقطة فيما بعد. وبعبارةٍ أخرى، ثمة اختلاف تام بين الأشخاص وبين النظريات التي نُسبت إليهم.

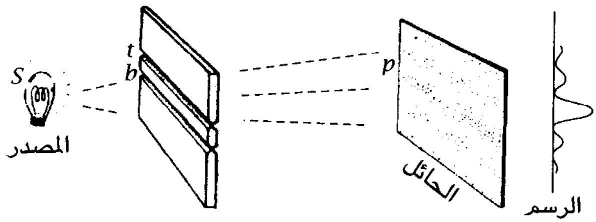
والآن حسنًا، هل يوجد حقًّا هذان المستويان المختلفان الموضحان في الشكل (٢-١)؟ أعتقد أن بإمكاني طرح السؤالين الآتيين: هل الكون محكوم بدقة بقوانين ميكانيكا الكم وحدها؟ وهل نستطيع تفسير الكون بأكمله من خلال ميكانيكا الكم؟ لتناول هذين السؤالين يتعين أن أقول شيئًا عن ميكانيكا الكم، ولكن دعوني في البداية أعرض عليكم قائمة موجزة لبعض الأشياء التي يمكن لميكانيكا الكم أن تفسرها:

- استقرار الذرات: قبل اكتشاف ميكانيكا الكم، لم يكن مفهومًا سبب عدم اتخاذ الإلكترونات داخل الذرات طريقًا حلزونيًّا إلى النوى الخاصة بها، كما ينبغي عليها أن تفعل طبقًا للوصف الكلاسيكي التام، حيث يجب ألا تكون هناك ذرات مستقرة من وجهة النظر الكلاسيكية.
- خطوط الطيف: أدى وجود مستويات الطاقة المكممة في الذرات والانتقال فيما بينها إلى نشوء خطوط الانبعاث التي نلاحظها بأطوال موجية محددة بدقة.
- القوى الكيميائية: القوى التي تمسك الجزيئات معًا هي قوى ميكانيكية كمية لآخر وهما يسقطان معًا، ستتمامًا بطبيعتها.
- إشعاع الجسم الأسود: يمكن فهم إشعاع الجسم الأسود فقط إذا كان الإشعاع نفسه مُكَمَّمًا.
- مصداقية الوراثة: يعتمد هذا على ميكانيكا الكم عند المستوى الجزيئي للـ DNA
- أشعة الليزر: يعتمد عمل أشعة الليزر على وجود انتقالات كمية محفِّزة بين الحالات الميكانيكية الكمية للجزيئات وعلى طبيعة (بوز-أينشتاين) Bose-Einstein الكمية للضوء.

- الموصلات الفائقة superconductors والموائع الفائقة superfluids: هذه الظواهر تحدث عند درجات حرارة منخفضة جدًا وتكون مصحوبة بمعاملات ارتباط كمية طويلة المدى بين الإلكترونات (والجسيمات الأخرى) في المواد المختلفة.
- ... إلخ

بعبارةٍ أخرى، تُعتبر ميكانيكا الكم منتشرة إلى حد بعيد حتى في إطار الحياة اليومية، كما تُعد المحور الرئيسي لمجالات عديدة للتكنولوجيا المتقدمة، بما في ذلك أجهزة الكمبيوتر الإليكترونية. أيضًا، فإن نظرية المجال الكمي — وهي اتحاد ميكانيكا الكم مع النظرية النسبية لأينشتاين — نظرية جوهرية لفهم فيزياء الجسيمات. وكما سبق وذكرنا، فإن نظرية المجال الكمي معروفة بأنها دقيقة لما يصل إلى نحو جزء واحد من 10^{11}. وتشير القائمة السابقة إلى مدى روعة ميكانيكا الكم وتأثيرها القوي.

دعوني الآن أذكر لكم قدرًا قليلًا حول ماهية ميكانيكا الكم. يوضح الشكل (٢-٢) تجربة نموذجية؛ فطبقًا لميكانيكا الكم، يتكون الضوء من جسيمات تُسمى فوتونات photons، ويوضح الشكل مصدرًا للفوتونات نفترض أنه يبعث واحدًا تلو الآخر في كل مرة. ويوجد شقان طوليان t وb وخلفهما حائل تصل إليه الفوتونات كأحداث فردية، حيث من الواضح في الشكل أن الفوتونات تصل إليه بصورة منفصلة بعضها عن بعض، كما لو كانت مجرد جسيمات عادية. ويبرز السلوك الكمي بالشكل التالي؛ إذا كان الشق الطولي t فقط مفتوحًا والآخر مغلقًا، فيمكن أن تصبح هناك مواقع عديدة على الحائل يستطيع أن يصل إليها الفوتون. وإذا أغلقنا الآن الشق الطولي t وفتحنا b، لوجدنا مرةً أخرى أن الفوتون استطاع الوصول للنقطة نفسها على الحائل. لكن إذا فتحنا الشقين الطوليين كليهما واخترنا نقطتنا على الحائل بدقة، فقد نجد الآن أن الفوتون لا يستطيع الوصول إلى تلك النقطة، مع أنه استطاع أن يفعل ذلك في حالة فتح شق طولي واحد فقط من الاثنين. وبطريقةٍ أو بأخرى، فإن الاحتمالين اللذين يمكن للفوتون أن يقوم بهما قد يلغي أحدهما الآخر. وهذا النوع من السلوك لا يحدث في



شكل ٢-٢: تجربة الشقين الطوليين، وانبعاث الفوتونات الفردية لضوء أحادي اللون.

الفيزياء الكلاسيكية، إما أن يحدث شيء واحد أو الشيء الآخر، فلا يمكن أن يحدث الاحتمالان لأنهما بطريقةٍ ما يلغي أحدهما الآخر.

إن الطريقة التي نفهم بها نتيجة هذه التجربة في نظرية الكم هي أن نقول إن الفوتون عندما يتخذ مسارًا من المصدر إلى الحائل، فإن حالة الفوتون لا تكون المرور من أحد الشقين أو الآخر، لكنها تكون نوعًا من الاتحاد الغامض بين الحالتين المشتمل على الأعداد المركبة؛ أي يمكن أن نكتب حالة الفوتون على الصورة الآتية:

(المسار B البديل) × **z** + (المسار A البديل) × **w**

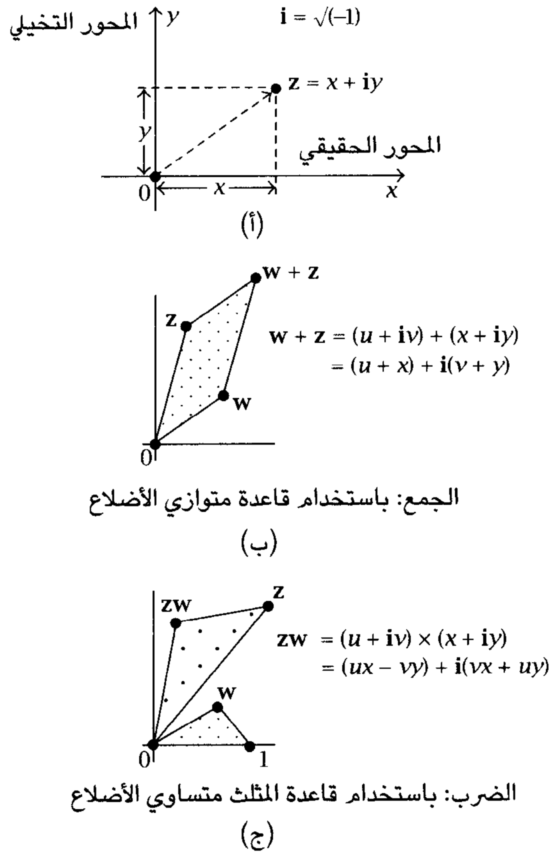
حيث **w** و**z** عددان مركبان. (وA البديل قد يمثل المسار stp الذي يتخذه الفوتون في الشكل (٢-٢)، كما أن B البديل يشير إلى المسار sbp.)

الآن، من المهم أن يكون العددان المضروبان في البديلين عددين مركبين، وذلك هو السبب وراء حدوث عمليات الإلغاء. ولربما نعتقد أننا نستطيع استنباط سلوك الفوتون بلغة الاحتمالات بأنه فعل شيئًا أو آخر، ومن ثم يمكن ترجيح احتمالية كون كل من **w** و**z** عددين حقيقيين، إلا أن هذا التفسير غير صحيح لأن **w** و**z** عددان مركبان. هذا هو الأمر المهم في ميكانيكا الكم. فنحن لا نستطيع شرح الطبيعة غير المنتظمة للجسيمات الكمية بلغة «عدم ثبات احتمالية» البديلين، فهما بديلان مكونان من عددين

مركبين. بذلك، فإن الأعداد المركبة تحتوي على الجذر التربيعي لسالب واحد، $\mathbf{i} = \sqrt{(-1)}$، إضافةً إلى الأعداد الحقيقية المعتادة. ويمكن تمثيل الأعداد المركبة بيانيًّا بشكل تخطيطي ثنائي الأبعاد، حيث يمثل المحور x أو المحور الحقيقي الأعداد الحقيقية البحتة، ويمثل المحور y أو المحور التخيلي الأعداد التخيلية البحتة، كما هو موضح في الشكل (٢-٣) القسم (أ). وعمومًا، فإن أي عدد مركب هو نوع من اتحاد الأعداد الحقيقية البحتة بالأعداد التخيلية البحتة، مثل العدد $[2 + 3\sqrt{(-1)} = 2 + 3\mathbf{i}]$، ويمكن تمثيل هذا العدد المركب بنقطة في الشكل التخطيطي (٢-٣) القسم (أ)، المعروف غالبًا باسم شكل أرجاند Argand diagram (أو سطح فيسيل Wessel plane — أو سطح جاوس Gauss plane).

يمكن تمثيل كل عدد مركب بنقطة في الشكل (٢-٣) القسم (أ)، وتوجد قواعد متعددة لكيفية جمع هذه الأعداد، وضربها وهكذا. مثلًا، لجمع الأعداد المركبة، يمكن استخدام قاعدة متوازي الأضلاع، التي تُستخدم لجمع الأعداد الحقيقية معًا والتخيلية معًا كل على حدة، كما يتضح من الشكل (٢-٣) القسم (ب). أيضًا، يمكن ضرب هذه الأعداد معًا باستخدام قاعدة المثلث متساوي الأضلاع، كما يبين الشكل (٢-٣) القسم (ج). وبعد أن تصبح معتادًا على الأشكال البيانية كتلك المرسومة في الشكل (٢-٣)، تغدو الأعداد المركبة مادية أكثر من كونها مجردة. وحقيقة أن هذه الأعداد معتمدة على أسس نظرية الكم تجعل الناس يشعرون غالبًا بأن النظرية على الأرجح مجردة وليست من النوع الذي يسهل معرفته، لكن بمجرد أن نعتاد على الأعداد المركبة، خاصةً بعد إجادة تمثيلها على شكل أرجاند، تصبح مادية للغاية ومن السهل التعامل معها.

بالإضافة إلى كل ما سبق، يوجد في نظرية الكم ما هو أكثر من تراكب الحالات المشتملة على الأعداد المركبة. حتى الآن، ما زلنا عند المستوى الكمي، حيثما تُطَبَّق القواعد التي أعطيتها الرمز **U**. عند ذلك المستوى، تتكون حالة النظام من تراكب كل البدائل المحتملة الذي يشتمل على أعداد مركبة. ويُسمى تطور زمن الحالة الكمية التطور الوحدوي unitary



شكل ٢-٣: (أ) تمثيل عدد مركب في مستوى (فيسيل-أرجاند-جاوس) المركب (ب) التمثيل الهندسي لجمع الأعداد المركبة (ج) التمثيل الهندسي لضرب الأعداد المركبة.

evolution (أو تطور شرودنجر) — الذي يمثله الرمز U — ومن الخواص المهمة للتطور الوحدوي أنه خطي. وهذا يعني أن تراكب حالتين دائمًا ما يتطور بالطريقة نفسها التي تتطور بها أي من الحالتين كل منهما على حدة، لكنهما تراكبا معًا في ظل اشتمالهما على الأعداد المركبة التي

تبقى ثابتة بمرور الزمن. وهذه الخاصية الخطية تُعد سمة أساسية لمعادلة شرودنجر. وعند المستوى الكمي، يظل هذا التراكب المشتمل على الأعداد المركبة مستمرًّا.

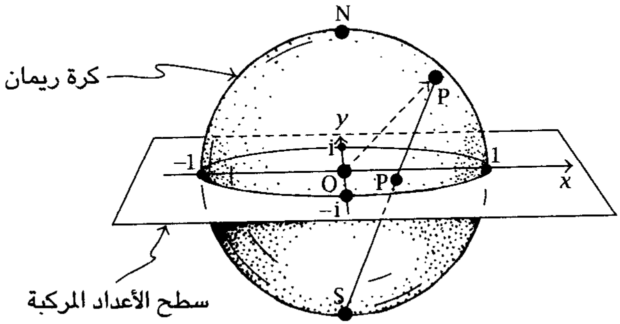
عندما تتعامل مع شيء ما من مستوى كلاسيكي، فإنك بذلك تغير القواعد. وبإجراء ذلك، يُنْتَقل من المستوى U في القمة إلى المستوى C في القاع في شكل (٢-١) — وهذا هو ما يحدث فيزيائيًّا — على سبيل المثال، عندما تحدد نقطة معينة على الحائل. وأي حدث كمي ضيق النطاق يؤدي إلى وقوع حدث أكبر، يمكن رؤيته بالتأكيد على المستوى الكلاسيكي. وما نفعله في نظرية الكم القياسية هو الاستعانة بإجراء ما لا يحبذ كثيرٌ من الناس الاستعانة به. وهذا الإجراء هو ما يُطلق عليه انهيار الدالة الموجية أو اختزال متجه الحالة، وفي الشكل أُشير إلى هذا الإجراء بالحرف R. يعني ذلك أننا نفعل شيئًا مختلفًا تمامًا عن التطور الوحدوي. في أي تراكب لبديلين ننظر إلى العددين المركبين ونحسب تربيعي مقياسهما — أي تربيع المسافة بين نقطتي أصل كلتا النقطتين في سطح أرجاند — ويصبح هذان التربيعان نسبتي احتمالات البديلين، لكنّ هذا لا يحدث إلا عندما نجري قياسًا أو نقوم بملاحظة. ويمكن أن نتعرف على كيفية القيام بذلك من منظور عملية تصعيد الظاهرة من المستوى U إلى المستوى C الموضحين في الشكل (٢-١). وعن طريق هذه العملية، يحدث تغيير للقواعد، بمعنى أنه لم يعد هناك تراكب خطي. وفجأة تصبح نسبتا تربيعي المقياسين احتمالين. وفقط من خلال الانتقال من المستوى U إلى المستوى C، تظهر اللاحتمية عند اختزال متجه الحالة أو R، إذ إن كل ما هو في المستوى U حتمي، وتصبح ميكانيكا الكم غير حتمية، فقط عندما نجري قياسًا.

ومن ثَم، فإن هذه هي الخطة التي نستخدمها في ميكانيكا الكم القياسية، وهو نموذج بالغ الغرابة لخطة تخص نظرية مهمة. وربما لو كانت مجرد أفكار تقريبية لنظرية أخرى أكثر أهمية، فكانت لتغدو أكثر بداهةً، إلا أن هذا الإجراء المشوش في حد ذاته يحظى بتقدير من كل المتخصصين باعتباره نظرية أساسية!

دعوني الآن أتحدث أكثر قليلًا عن هذه الأعداد المركبة. وفي البداية، تبدو هذه الأعداد وكأنها أعداد مجردة لا تؤدي أية وظيفة حتى نحسب تربيع مقاييسها، ثم تصبح بعدها احتمالات. في واقع الأمر، إنها تمتلك خاصية هندسية بحتة، ولذا أريد أن أقدم مثالًا يمكن من خلاله تقدير أهميتها بصورة أوضح. ولكن قبل تقديم هذا المثال، سأتحدث قليلًا عن ميكانيكا الكم، وسوف أستخدم الأقواس التي يُطلق عليها اسم أقواس ديراك Dirac، وهي ببساطة اختزال لوصف حالة النظام — فعندما أكتب ⟨A| فإنني أقصد أن النظام في الحالة الكمية A — فيكون ما بداخل القوسين وصفًا للحالة الكمية، وفي الأغلب الأعم تُكتب الحالة الميكانيكية الكمية الإجمالية للنظام بالصورة ψ، التي هي نوع من التراكب لحالات أخرى. ويمكن أن نصيغ ذلك بالطريقة التالية بالنسبة لحالة تجربة الشقين الطوليين:

$$|\psi\rangle = \mathbf{w}|A\rangle + \mathbf{z}|B\rangle$$

في ميكانيكا الكم لا نهتم بشدة بأحجام الأعداد في حد ذاتها كما نهتم بنسبها. وهناك قاعدة في ميكانيكا الكم تتيح لنا ضرب الحالة في عدد مركب معين دون تغيير الوضع الفيزيائي (ما دام ذلك العدد المركب لا يساوي الصفر). بعبارةٍ أخرى، إن نسب هذه الأعداد المركبة هي فقط التي تنطوي على معنى فيزيائي مباشر، وعندما يُختزل متجه الحالة ننظر إلى الاحتمالات، ومن ثم يكون المطلوب حساب نسب تربيع المقاييس. لكن إذا كنا سنظل عند المستوى الكمي فسنستطيع أن نأمل أيضًا في إيجاد تفسير لنسب هذه الأعداد المركبة نفسها، حتى قبل حساب مقاييسها. ثمة وسيلة لتمثيل الأعداد المركبة على سطح كرة، باستخدام كرة ريمان (انظر شكل ١-١٠ القسم ج). والجدير بالذكر أننا لا نتعامل فقط مع الأعداد المركبة، ولكن مع نسب الأعداد المركبة. ويتعين علينا توخي الحذر عند التعامل مع هذه النسب لأن المقدار الموجود في المقام قد يكون صفرًا، وفي هذه الحالة تصبح النسبة لامتناهية، وعلينا أيضًا التعامل مع تلك الحالة. ونستطيع أن نضع كل الأعداد المركبة معًا، وكذلك الأعداد اللامتناهية، على سطح كرة من



شكل ٢-٤: كرة ريمان. يحدث إسقاط للنقطة P التي تمثل $u = z/w$ على سطح الأعداد المركبة من القطب الجنوبي S إلى النقطة P′ على الكرة. ويُعد الاتجاه OP′، من مركز الكرة O، هو اتجاه محور الدوران لحالة تراكب جسيمين يدوران نصف دورة.

خلال الإسقاط الدقيق الذي يكون فيه سطح أرجاند هو السطح الأفقي المار بمركز الكرة، الذي يقطع الكرة في دائرة الوحدة، التي هي مركز الكرة (شكل ٢-٤). من الواضح أننا نستطيع إسقاط كل نقطة على السطح الأفقي المار بمركز الكرة على كرة ريمان من قطبها الجنوبي. وكما هو واضح في الشكل، فإن القطب الجنوبي لكرة ريمان سوف يتطابق في هذا الإسقاط مع النقطة الواقعة في نطاق اللانهاية في سطح أرجاند.

إذا كان لمنظومة كمية حالتان بديلتان فإن الحالات المختلفة التي يمكن أن تنتج عن اتحاد هاتين الحالتين تمثلها كرة — تكون مجردة عند هذه المرحلة — لكن هناك حالات معينة يمكن رؤيتها فيها فعليًّا. وشخصيًّا أرى أن المثال التالي غاية في الوضوح فيما يتعلق بهذا الصدد: إذا كان لدينا جسيم يدور نصف دورة، مثل الإلكترون أو البروتون أو النيوترون، إذن يمكن التحقق هندسيًّا من الاتحادات المختلفة لحالات دورانهم. وفي الواقع، يمكن أن يكون للجسيمات ذات نصف الدورة حالتان للدوران، إحداهما مع متجه الدوران الذي يشير لأعلى (الحالة العليا) والأخرى مع متجه الدوران

الذي يشير لأسفل (الحالة السفلى). ويمكن تمثيل تراكب الحالتين رمزيًّا بالمعادلة الآتية:

$$|\nearrow\rangle = w|\uparrow\rangle + z|\downarrow\rangle$$

والاتحادات المختلفة لحالات الدوران هذه ينجم عنها دوران حول محور آخر، وإذا أردنا أن نعرف مكان هذا المحور نأخذ نسبة العددين المركبين w وz التي تسفر عن عدد مركب آخر هو $u = z/w$. ونضع العدد u على كرة ريمان، ويصبح اتجاه ذلك العدد المركب من المركز هو اتجاه محور الدوران، ولذلك نرى أن الأعداد المركبة في ميكانيكا الكم ليست مجردة بالدرجة نفسها كما تبدو في البداية،لآخر وهما يسقطان معًا، ست إذ إنها تمتلك معنى محددًا — أحيانًا يكون صعبًا نوعًا ما في التوصل إليه — لكن في حالة جسيم نصف الدورة يكون المعنى واضحًا إلى حدٍّ بعيد.

وهذا التحليل لجسيمات نصف الدورة يقول لنا شيئًا آخر؛ وهو أنه لا توجد طبيعة خاصة للدوران المتجه لأعلى أو الدوران المتجه لأسفل. علاوةً على ذلك، قد يروق لي اختيار أي محور آخر غير هذين، لنقل مثلًا الأيسر أو الأيمن أو الأمامي أو الخلفي، حيث لا يحدث ذلك أدنى فرق. ويتضح من هذا أنه لا توجد طبيعة خاصة تتعلق بالحالتين اللتين بدأنا بهما (فيما عدا أن حالتي الدوران المختارتين لا بد أن تكونا في اتجاهين متضادين). وطبقًا لقواعد ميكانيكا الكم، فإن أية حالة دوران أخرى تُعتبر مكافئة في الجودة تمامًا لأي من الحالتين اللتين بدأنا بهما، ويتبين هذا بوضلآخر وهما يسقطان معًا، ستوح من خلال المثال التالي.

إن ميكانيكا الكم من الموضوعات الشيقة والمحددة، ومع ذلك فإنها تنطوي أيضًا على كثير من الألغاز. وبالتأكيد، فإنها موضوع غامض، وبأساليب عديدة متباينة، موضوع مثير للارتباك وكله تناقض. وفي هذا الصدد أريد أن أؤكد أن بها ألغازًا من نوعين مختلفين؛ ألغاز Z وألغاز X.

والألغاز Z هي الألغاز المثيرة للارتباك؛ فهي تعبر عن أشياء موجودة بالفعل في العالم الفيزيائي، بمعنى أنه توجد تجارب جيدة تقول لنا

إن ميكانيكا الكم تعمل بطرق غامضة. ربما لم نتمكن بعد من اختبار بعض هذه التأثيرات بشكل تام، لكن تراودنا بعض الشكوك القليلة جدًّا بخصوص صحة ميكانيكا الكم. وتتضمن هذه الألغاز ظواهر مثل ازدواجية الموجة-الجسيم التي أشرت إليها مسبقًا والقياسات الصفرية التي سوف أتحدث عنها بعد قليل والدوران الذي تحدثت عنه منذ برهة، والتأثيرات اللاموضعية التي سوف أتحدث عنها أيضًا بعد قليل. وهذه الأمور بالفعل تُعد من الظواهر المثيرة للارتباك، إلا أن عددًا قليلًا من الناس يقدمون معالجات حول واقعيتها باعتبارها بالتأكيد جزءًا من الطبيعة.

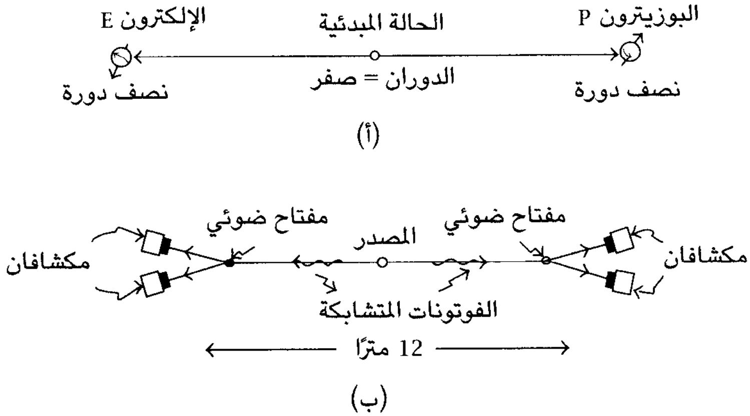
بالإضافة إلى ذلك، هناك نوعٌ آخر من الألغاز أشير إليه بالألغاز X التي هي ألغاز التناقض. وطبقًا لأسلوبي في التفكير، تُعد هذه الألغاز مؤشرات لعدم اكتمال النظرية أو عدم صحتها أو أي شيء آخر من هذا القبيل، بمعنى أنها تحتاج إلى قدر كبير من الاهتمام. ويتعلق اللغز X الأساسي بمشكلة القياس التي سبق وناقشتها فيما سبق — عند حديثنا عن حقيقة أن القواعد تتغير من **U** إلى **R** عندما ننتقل من المستوى الكمي إلى المستوى الكلاسيكي — ولكن هل نستطيع أن نفهم لماذا ينتج الإجراء **R** من الأساس، باعتباره عملية تقريبية أو مجرد خيال، إذا كنا قد فهمنا بشكل أفضل مدى السلوك الهائل والمعقد للنظم الكمية؟ وأكثر التناقضات شهرة في ألغاز التناقض لآخر وهما يسقطان معًا، ست X هي التي تخص قطة شرودنجر. في هذه التجربة — التي أؤكد أنها مجرد تجربة فكرية لأن شرودنجر كان رجلًا بالغ الإنسانية — تكون القطة في حالة الحياة والموت في الوقت نفسه. وفي الواقع، لم نشاهد إطلاقًا قطة مثل هذه، وسوف أتحدث أكثر عن هذه المسألة فيما بعد.

في رأيي، يجب أن نتجاوز عن الألغاز من نوع Z، لكن يتعين أن تُلغى الألغاز من نوع X عندما نحصل على نظرية أفضل. ومرةً أخرى، أؤكد أن هذا الرأي هو رأيي الشخصي في الألغاز X. وعلى النقيض من ذلك، ينظر كثيرون إلى التناقضات «الواضحة» في نظرية الكم من منظور مختلف، أو ينبغي أن أقول من مناظير مختلفة.

والآن، دعوني أقل شيئًا عن الألغاز Z قبل أن أصل إلى المشكلات الأكثر خطورة للألغاز X. وفيما يأتي، سوف أناقش اثنين من أهم ألغاز Z اللافتة للنظر: أحد هذين اللغزين يتعلق بمسألة اللاموضعية الكمية، أو كما يفضل البعض نعتها بالتشابك الكمي quantum entanglement، الذي يُعد أمرًا بالغ الغرابة. وقد جاءت فكرته أصلًا من أينشتاين وزميليه، بودولسكي Podolsky وروسين Rosen، وتُعرف هذه الفكرة باسم تجربة EPR — نسبةً إلى الحروف الأولى لأسماء العلماء الثلاثة — وقد قدم نسخة التجربة المحتمل أن تكون أيسر في الفهم دافيد بوهم David Bohm. ويتمثل محور هذه التجربة في وجود جسيم حركته الدورانية تساوي صفرًا، وينقسم هذا الجسيم إلى جسيمين لكل منهما نصف دورة، لنقل مثلًا إنهما إلكترون وبوزيترون ينطلقان في اتجاهين متضادين. بعد ذلك، يُقاس دورانا الجسيمين اللذين انطلقا إلى نقطتين بعيدتين بعضهما عن بعض؛ هما النقطتان A وB.

وتوجد نظرية بالغة الشهرة لجون بل John Bell تقول لنا إن هناك تعارضًا بين توقعات ميكانيكا الكم الخاصة بالاحتمالات المشتركة لنتائج القياسات عند النقطتين A وB وأي نموذج واقعي موضعي. وما أعنيه بنموذج واقعي موضعي أنه نموذج يكون للإلكترون فيه وجود عند النقطة A، ويكون للبوزيترون وجود آخر عند النقطة B، وأن يكونا منفصلين أحدهما عن الآخر، وليس بينهما اتصال من أي نوع. ومن ثم، يؤدي هذا الافتراض إلى نتائج عن الاحتمالات المشتركة للقياس الذي يمكن إجراؤه عند النقطتين A وB، تلك الاحتمالات التي تتعارض مع ميكانيكا الكم، وقد أوضح جون بل هذا على نحو بالغ. في الواقع، تُعتبر هذه النتيجة مهمة جدًّا، وجاءت التجارب التالية، مثل التي أجراها ألان أسبيه Alain Aspect في باريس، لتؤكد هذا التنبؤ لميكانيكا الكم. وهذه التجربة يوضحها الشكل (٥-٢) وتتعلق بحالات الاستقطاب لأزواج الفوتونات المنبعثة في اتجاهات متضادة من مصدر مركزي.

لا يُتَّخَذ قرار عن أي اتجاهات استقطاب الفوتون سيتم قياسها حتى تنطلق الفوتونات بالكامل بعيدًا عن المصدر إلى المكشافين عند A وB.



شكل ٢-٥: (أ) ينقسم جسيم دورانه صفر إلى جسيمين دوران كل منهما نصف دورة، وهما الإلكترون E والبوزيترون P. وقياس دوران أحد هذين الجسيمين يؤدي فورًا لتثبيت حالة دوران الجسيم الآخر. (ب) تجربة EPR لألان أسپيه وزملائه، تنبعث أزواج الفوتونات من المصدر في حالة تشابك، ولا يُتَّخَذ أي قرار عن الاتجاه الذي يتخذه كل فوتون لقياس استقطابه حتى تنطلق الفوتونات جميعها — أي يصبح الوقت متأخرًا جدًّا على وصول رسالة إلى الفوتون المضاد — لإخباره عن اتجاه القياس.

وأظهرت نتائج هذه القياسات بوضوح أن الاحتمالات المشتركة لحالات استقطاب الفوتونات المرصودة عند A وB تتفق مع تنبؤات ميكانيكا الكم، وهو ما كان يعتقده أغلب العلماء، بما فيهم جون بل نفسه، لكن بانتهاك الافتراض الطبيعي بأن هذين الفوتونين جسمان مستقلان أحدهما عن الآخر. وقد أكدت تجربة أسپيه حدوث تأثيرات التشابك الكمي لمسافة نحو ١٢ مترًا. وقد قيل لي إنه توجد الآن تجارب متعلقة بالتشفير الكمي المعروف باسم الكريبتوجرافي cryptography تحدث فيها تأثيرات مشابهة لمسافات تبلغ عدة كيلومترات.

ينبغي أن أؤكد أن الأحداث في هذه التأثيرات اللاموضعية تقع عند النقطتين المنفصلتين A وB، لكنها تكون على صلة بعضها ببعض بأساليب غامضة. والطريقة التي تتصل بها الأحداث — أو تتشابك — تعتبر أمرًا بالغ الدقة، إذ إنها تتشابك بطريقة ما لا تستخدم التشابك في بعث إشارة من A إلى B، وهذا مهم جدًّا لتواؤم ميكانيكا الكم مع النسبية، وإلا لبات من المحتمل استخدام التشابك الكمي لبعث رسائل بسرعة أكبر من سرعة الضوء. ويعتبر التشابك الكمي نموذجًا بالغ الغرابة، حيث إنه يكون في موضع ما بين أجسام تكون منفصلة وتكون على صلة أحدها بالآخر، إنها ظاهرة خاصة بميكانيكا الكم فقط ولا يوجد نظير لها في الفيزياء الكلاسيكية.

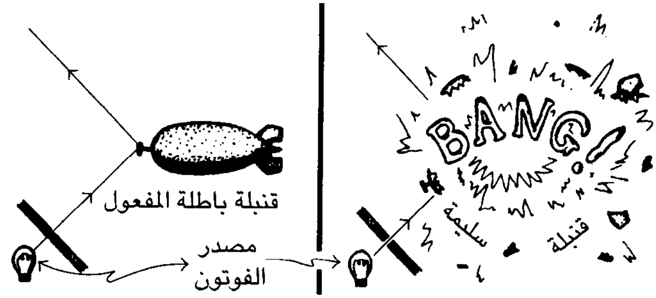
وإليك الآن مثال ثان للألغاز *Z* يتعلق بالقياسات الصفرية وهذا المثال تشرحه بصورة جيدة تجربة اختبار القنابل لكل من إليتزار وفيدمان: لنفترض أن أحد الأشخاص مثلًا ينتمي إلى مجموعة من الإرهابيين وأنه تصادف ووجد مجموعة كبيرة من القنابل. وكل قنبلة لها فتيل تفجير في مقدمتها فائق الحساسية، لدرجة أن فوتونًا ضوئيًّا مرئيًّا واحدًا معكوسًا على مرآة صغيرة موجودة عند طرف مقدمة القنبلة يمكن أن يؤثر على الفتيل بدرجة تكفي لتفجير القنبلة تفجيرًا عنيفًا. ومع ذلك فيمكن أن توجد نسبة كبيرة أخرى من القنابل التي لم تنفجر بين المجموعة الكاملة للقنابل، لذا فهي تُعد باطلة المفعول بصورة خاصة. ويكمن الخلل في أن الكابس الرقيق الذي تُعلق به المرآة يمكن أن يكون قد التصق أثناء التصنيع وأُعيقت حركته، ومن ثَم عندما ينعكس فوتون واحد بمرآة قنبلة باطلة المفعول، فإن المرآة لا تحرك الكابس، ومن ثم لا تنفجر القنبلة (شكل ٢-٦ القسم أ). والنقطة الأساسية هنا أن المرآة الموجودة على مقدمة القنبلة باطلة المفعول تعمل الآن وكأنها مجرد مرآة عادية ثابتة، بدلًا من أن تكون مرآة متحركة تعمل كجزء من آلية التفجير. ولذلك هنا تكمن المشكلة — فحاول مثلًا في أيامنا هذه العثور على قنبلة سليمة مضمونة ضمن مجموعة كبيرة من القنابل المشتملة على قنابل باطلة المفعول. وفي الفيزياء الكلاسيكية، لا توجد

ببساطة وسيلة تستطيع من خلالها إجراء ذلك، والطريقة الوحيدة للاختبار هي أن تجعل فتيل التفجير يهتز ومن ثَم تنفجر القنبلة، إذا كانت سليمة.

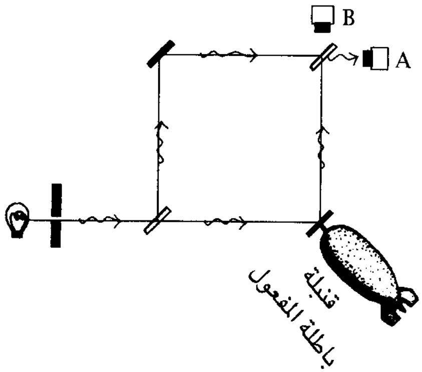
وعلى نحو استثنائي تام، تتيح لنا ميكانيكا الكم اختبار هل من الممكن أن يحدث شيء لكنه لم يحدث. إنها تختبر ما يطلق عليه الفلاسفة الحقائق المضادة. واللافت للنظر أن ميكانيكا الكم تتيح حدوث تأثيرات حقيقية من حقائق مضادة.

دعوني أوضح لكم كيف يمكن حل المشكلة، حيث يبين الشكل (٢-٦) القسم (ب) النسخة الأصلية للحل الذي قدمه إليتزار وفيدمان عام ١٩٩٣. افترض أن لدينا قنبلة باطلة المفعول وبها مرآة مُثبتة جيدًا، فهي لا تتعرض لأي اهتزازات مؤثرة، ولا يوجد تفجير عندما ينعكس فوتون على سطحها. وفي الشكل (٢-٦) القسم (ب)، أوضحنا في الواقع ترتيب هذه العملية. في البداية، ينبعث فوتون يصطدم بمرآة نصف مفضضة، تنقل نصف الضوء الساقط عليها وتعكس النصف الآخر. وقد يتبادر لتفكيرنا أن ذلك يعني أن نصف الفوتونات التي اصطدمت بالمرآة مرت من خلالها وارتد النصف الآخر. ومع ذلك، فإن هذا ليس ما يحدث على الإطلاق في المستوى الكمي للفوتونات الفردية. في واقع الأمر، فإن كل فوتون بمفرده انبعث من المصدر وُضع داخل حالة تراكب كمي لكلا المسارين البديلين للفوتون: المار والمنعكس. وتوضع مرآة القنبلة في وضع مائل لتتخذ زاوية قياسها 45 درجة في مسار شعاع الفوتون المار. أما جزء شعاع الفوتون المنعكس من المرآة نصف المفضضة، فإنه يصطدم بمرآة أخرى مفضضة بالكامل، موضوعة أيضًا بزاوية 45 درجة، ثم يصل الشعاعان معًا إلى مرآة أخيرة نصف مفضضة، كما هو مشار إليه في الشكل (٢-٦) القسم (ب)، وفي النقطتين A وB، يوجد مكشافان.

لنر الآن ما يمكن أن يحدث لأحد الفوتونات المنبعث من المصدر، عندما تكون القنبلة باطلة المفعول. عندما يصطدم الفوتون بالمرآة الأولى نصف المفضضة، تنقسم حالته إلى حالتين منفصلتين، إحداهما تنطبق على الفوتون المار خلال المرآة نصف المفضضة ويتجه رأسًا إلى القنبلة باطلة



(أ)



(ب)

شكل ٢-٦: (أ) تجربة إليتزار وفيدمان لاختبار القنبلة: يستجيب فتيل تفجير القنبلة فائق الحساسية لتأثير فوتون ضوئي مرئي واحد، على افتراض أن القنبلة ليست باطلة المفعول لأن فتيل تفجيرها مُثبت جيدًا. تكمن المشكلة في العثور على قنبلة سليمة مضمونة ضمن عدد كبير من القنابل محل شك. (ب) ترتيب إجراءات العثور على قنبلة سليمة في ظل وجود قنابل باطلة المفعول، وبالنسبة لقنبلة سليمة تعمل المرآة السفلية إلى اليمين كأداة قياس. وعندما ينتج عن القياس أن أحد الفوتونات سار في طريق آخر، يتيح هذا للمكشاف عند النقطة B استقبال الفوتون، وهو ما لا يحدث لقنبلة باطلة المفعول.

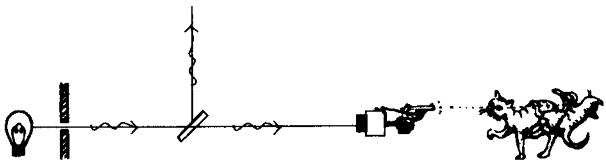
المفعول، والأخرى تنطبق على الفوتون المنعكس في اتجاه المرآة الثابتة. (يُعد هذا التراكب لمساري الفوتون البديل هو ما يحدث تمامًا في تجربة الشقين الطوليين الموضحة في الشكل (٢-٢). كما يعبر أيضًا بصورة أساسية عن الظاهرة التي تحدث عندما نجمع الدورانات معًا.) فنحن نفترض أن طولي المسارين من المرآة الأولى نصف المفضضة إلى الثانية نصف المفضضة أيضًا متساويان تمامًا. وكي نعرف حالة الفوتون عندما يصل إلى المكشافين، يتعين علينا المقارنة بين المسارين اللذين يمكن أن يتخذهما الفوتون ليصل إلى أحد المكشافين، وهذان المساران يكونان في التراكب الكمي. ومع أن المسارين يلغي أحدهما الآخر عند B، فإنهما أحدهما يُضاف إلى الآخر عند A. ومن ثم، يمكن أن تكون هناك إشارة لتنشيط المكشاف A وليس المكشاف B. ويشبه هذا تمامًا نموذج التداخل interference الموضح في الشكل (٢-٢) إذ توجد بعض المواضع التي تنعدم فيها الكثافة تمامًا، لأن جزئي الحالة الكمية يلغي أحدهما الآخر عند تلك النقطة. ولذلك عند الانعكاس من قنبلة باطلة المفعول، ينشط المكشاف A دائمًا، وليس المكشاف B.

افترض أن لدينا الآن قنبلة سليمة، فحينئذٍ لن تظل المرآة ثابتة على مقدمتها، حيث إن إمكانية اهتزازها تحول القنبلة إلى أداة للقياس. ومن ثَم فإن القنبلة تقيس أحد بديلي الفوتون عند المرآة — يمكن حدوث هذا في حالة فوتون قد وصل بالفعل إلى المرآة أو لم يتمكن من الوصول. افترض أيضًا أن الفوتون مر خلال المرآة الأولى نصف المفضضة وأن المرآة الموجودة على مقدمة القنبلة كشفت أن الفوتون بالفعل قد اتخذ طريقه. بعد ذلك يحدث الانفجار، فنتجه إلى قنبلة جديدة ونحاول مرة أخرى ربما يحدث هذه المرة ما نريد وتقيس القنبلة أن الفوتون لا يصل — أي لا تنفجر القنبلة أساسًا — وبالتالي يحدد القياس أن الفوتون اتخذ المسار الآخر. (هذا هو القياس الصفري.) والآن، عندما يصل الفوتون إلى المرآة الثانية نصف المفضضة، فإنه يمر وينعكس عليها أيضًا، ولذلك من المحتمل أن ينشط المكشاف B. وهكذا، فإن الفوتون في حالة التعامل مع قنبلة سليمة، أحيانًا، يحدده المكشاف B، وهو ما يشير إلى أن الفوتون قد حددت

القنبلة قياسه بأنه اتخذ المسار الآخر. وتتمثل النقطة الأساسية في أنه عندما تكون القنبلة سليمة، فإنها تعمل كأداة للقياس، وهذا يتداخل مع الإلغاء الضروري واللازم للحيلولة دون الكشف عن الفوتون عند النقطة B، حتى إن لم يتفاعل الفوتون مع القنبلة، أي في حالة القياس الصفري. إذا لم يتخذ الفوتون مسارًا معينًا فإنه لا بد أن يتخذ المسار الآخر! وإذا كشفت النقطة B عن الفوتون نعلم أن القنبلة كانت تعمل كأداة قياس ومن ثَم تكون القنبلة سليمة. علاوةً على ذلك، فإن المكشاف B — عند التعامل مع قنبلة سليمة أحيانًا — يتمكن من قياس وصول الفوتون ولا تنفجر القنبلة. ويمكن أن يحدث هذا فقط إذا كانت القنبلة سليمة. ونحن نعلم أنها قنبلة سليمة لأنها قاست أن الفوتون اتخذ بالفعل المسار الآخر.

حقًّا، نستطيع أن نلاحظ أنه أمر غير عادي، ففي عام ١٩٩٤ قام تسايلنجر Zeilinger بزيارة أوكسفورد وأخبرني أنه أجرى بالفعل تجربة اختبار القنبلة. وفي الحقيقة، لم يختبر هو وزملاؤه القنابل، لكنه اختبر شيئًا آخر مماثلًا ظاهريًّا. وقد قال لي إنه توصل مع زملائه كويات Kwiat ووينفيرتر Weinfurter وكازفيتش Kasevich إلى حل أفضل يستطيعون من خلاله فعليًّا إجراء نمط التجربة نفسه دون تبديد أي قنابل على الإطلاق، ولكنني لن أوضح كيف فعلوا هذا نظرًا لأنهم أجروا خطوات بالغة التعقيد. ومن الناحية الفعلية، لم ينتج عن تجربتهم هذه سوى قدر صغير متضائل من الخسائر، لكن بشكل أساسي دون خسائر، نستطيع العثور على قنبلة سليمة مضمونة.

دعوني أترككم الآن مع الأمثلة التالية التي تشرح بعض جوانب الطبيعة الاستثنائية لميكانيكا الكم والألغاز Z الخاصة بها. وفي اعتقادي أن جزءًا من المشكلة يتمثل في أن بعض الناس ينخدعون بهذه الأشياء، فيبدءون في التفكير في مدى براعة ميكانيكا الكم، وفي الواقع يكونون على صواب. فهي بارعةٌ بالفعل في اشتمالها على كل هذه الألغاز من نوع Z، مثلها في ذلك مثل الظواهر الحقيقية، لكن يفكرون بعدها في أنهم مضطرون لتقبل الألغاز من نوع X أيضًا، ومن ثَمّ أعتقد أن ذلك خطأ!



شكل ٢-٧: قطة شرودنجر — تتضمن الحالة الكمية تراكبًا خطيًّا لفوتون منعكس وفوتون مار خلال المرآة. يتسبب الفوتون المار في إطلاق النار على القطة فيقتلها، ومن ثَمّ طبقًا للتطور الوحدوي (U) توجد القطة في تراكب بين الحياة والموت.

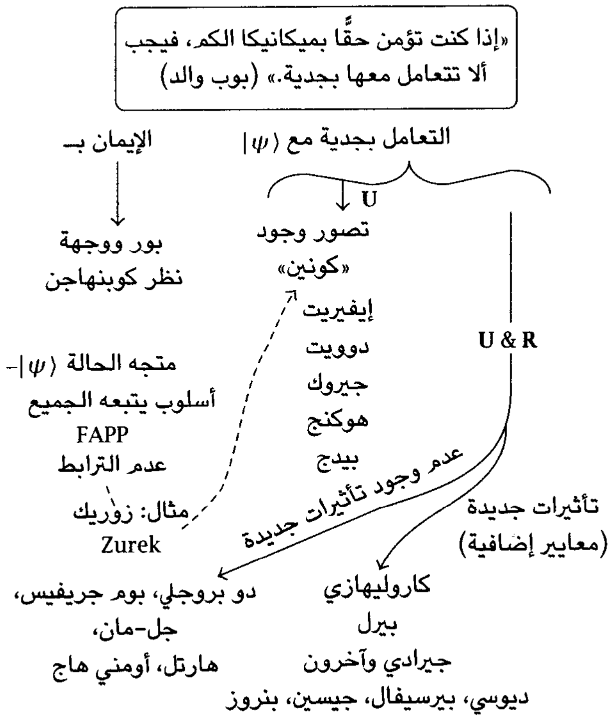
سوف أنتقل الآن للحديث عن قطة شرودنجر: إن نسخة التجربة الفكرية الموضحة في الشكل (٢-٧) ليست هي النسخة الأصلية لتجربة شرودنجر، لكنها تُعتبر مناسبة هنا في هذا السياق. وفي هذه التجربة، لدينا مرةً أخرى مصدر للفوتونات ومرآة نصف مفضضة تجزئ الحالة الكمية للفوتون المصطدم بالمرآة إلى تراكب لحالتين مختلفتين، إحداهما تنعكس على المرآة والأخرى تنفذ خلالها. ويوجد جهاز للكشف عن الفوتون في مسار الفوتون المار يسجل وصول أي فوتون بإطلاق النار من مسدس يقتل القطة. وقد يُعتقد أن القطة هي نقطة النهاية لعملية القياس؛ حيث إن الانتقال هنا يكون من المستوى الكمي إلى عالم الأجسام القابلة للوزن والقياس عندما نجد القطة إما ميتة أو حية. لكن المشكلة هي أنه إذا أخذنا المستوى الكمي باعتباره الأسلوب الملائم الحقيقي لمستوى القطط وخلافه، إذن يتعين علينا أن نعتقد أن الحالة الفعلية للقطة هي تراكب لكونها ميتة وحية في الوقت نفسه. والمسألة أن الفوتون يكون في تراكب لحالتين تتخذان طريقًا أو آخر، ويكون المكشاف في تراكب لحالتي التشغيل والتوقف، والقطة في تراكب لحالتي الحياة والموت، وهذه المشكلة معروفة منذ زمن طويل. ولكن ما رأي الناس في هذا الأمر؟ ربما توجد آراء كثيرة مختلفة حول ميكانيكا الكم أكثر من عدد علماء فيزياء الكم أنفسهم. وهذا ليس أمرًا ينم عن التناقض لأن بعض علماء فيزياء الكم لديهم رؤى مختلفة حول الموضوع نفسه.

وفيما يلي، أريد أن أعرض بالشرح تصنيف وجهات النظر المختلفة في إطار ملحوظة مدهشة أبداها بوب والد Bob Wald، حيث قال:

> «إذا كنت تؤمن حقًّا بميكانيكا الكم، فيجب ألا تتعامل معها بجدية.»

ويبدو لي أن هذه الملحوظة الخاصة بميكانيكا الكم وآراء الناس حولها صحيحة جدًّا ومؤثرة للغاية. وفي الشكل (٢-٨)، عمدت إلى تصنيف علماء فيزياء الكم إلى فئات مختلفة، وبصورةٍ خاصة، إلى هؤلاء الذين يؤمنون بها وأولئك الذين يتعاملون معها بجدية. ولكن ماذا أعني بالفئة الثانية؟ أعني الفئة التي تستخدم متجه الحالة $|\psi\rangle$ لوصف العالم الواقعي؛ إذ أن متجه الحالة يعبر عن شيء واقعي. وأولئك الذين يؤمنون حقًّا بميكانيكا الكم لا يعتقدون أن هذا هو الموقف الصحيح الواجب اتخاذه تجاه ميكانيكا الكم. وفي الشكل أوردت ذكر أسماء عدد من الناس، وحسب اعتقادي، فإن نيلز بور Niels Bohr وأتباع وجهة نظر مدرسة كوبنهاجن يُعدون ممن كانوا يؤمنون بميكانيكا الكم. وبالتأكيد كان بور يؤمن بميكانيكا الكم، لكنه لم يتعامل مع متجه الحالة بجدية باعتباره وصفًا للعالم. ونوعًا ما، كان متجه الحالة $|\psi\rangle$ أسلوبًا يتبعه الجميع؛ حيث كان سبيلنا لوصف العالم، ولم يكن العالم ذاته. وهذا أيضًا يؤدي إلى ما أطلق عليه جون بل John Bell «FAPP» أو لكل الأغراض العملية. كان جون بل يحبذ هذا التعبير، وفي اعتقادي لأن له صدى يحط من قدره قليلًا، حيث إنه يعتمد على «وجهة نظر غير مترابطة»، وسوف أتحدث عنها فيما بعد. وعندما نتساءل بدقة عن بعض أهم المناصرين بحماس لمبدأ FAPP، مثل زوريك Zurek، نجد أنهم يتراجعون إلى المنتصف في الشكل (٢-٨). والآن ماذا أعني بمنتصف الشكل؟

في حقيقة الأمر، قسمت الفئة التي تتعامل مع متجه الحالة بجدية إلى تصنيفات متباينة؛ منها هؤلاء الذين يعتقدون أن التطور الوحدوي هو الدعامة الأساسية لكل شيء — أي أنه يتعين علينا أن نعتمد عليه قلبًا



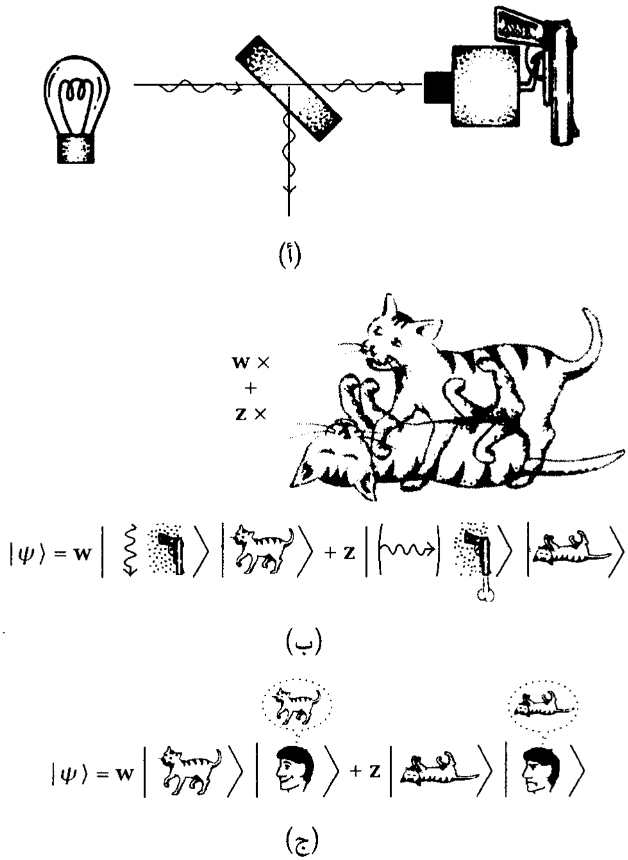
شكل ٢-٨

وقالبًا — ويؤدي هذا إلى تصور وجود «كونين». وفي إطار هذه الرؤية، تكون القطة حية وميتة في الوقت نفسه، لكن القطتين تسكنان في كونين مختلفين. وسوف أتحدث عن ذلك بشيء من التفصيل فيما بعد. والآن أعتقد أنني قد أشرت إلى مناصري وجهة النظر هذه، على الأقل فيما يتعلق ببعض مراحل تفكيرهم. ويحتل وسط الشكل المؤيدون لتصور وجود «كونين».

والناس الذين أشرت إليهم باعتبارهم يتعاملون بجدية مع متجه الحالة ⟨ψ|، وأنا من بينهم، هم الذين يؤمنون بأن كلًّا من التطور الوحدوي واختزال متجه الحالة ظاهرتان واقعيتان. ولا يقتصر الأمر فقط على حدوث التطور الوحدوي، ما دامت المنظومة صغيرة بطريقة ملحوظة، بل يوجد أيضًا شيء ما مختلف يحدث وهو الذي أسميه اختزال متجه الحالة — ربما لا يكون

اختزالًا تامًّا، لكنه شيء شبيه به. وإذا كنا نؤمن بذلك، قد نستطيع أن نتبنى إحدى وجهتي النظر هاتين. فيمكننا أن نتخذ وجهة النظر القائلة إنه لا وجود لتأثيرات فيزيائية جديدة يتعين وضعها في الاعتبار. وفي هذا الشكل، ضمنت وجهة نظر دو بروجلي de Broglie وبوم Bohm، إضافةً إلى وجهات النظر المختلفة تمامًا لكل من جريفيس Griffiths وجل-مان Gell-Mann وهارتل Hartle وأومني Omnés. وفي الحقيقة، نجد أن لاختزال متجه الحالة دورًا مهمًّا، علاوةً على ميكانيكا الكم القياسية للتطور الوحدوي، لكن لا يمكن أن نتوقع اكتشاف أي تأثيرات جديدة. بالإضافة إلى كل ما سبق، هناك من يتبنون وجهة النظر الثانية المتعلقة بالتعامل بجدية مع متجه الحالة، التي أتبناها شخصيًّا، والتي تقول إن شيئًا ما جديدًا سوف يحدث ويؤدي لتغيير بنية ميكانيكا الكم. وفي الواقع، فإن اختزال متجه الحالة يتناقض مع التطور الوحدوي؛ فثمة شيء جديد على وشك الحدوث. وفي الجانب الأيمن أسفل الشكل، أدرجت أسماء بعض متبني وجهة النظر هذه.

بعد هذا التوضيح، أريد أن أستفيض قليلًا لأشرح بالتفصيل شيئًا مهمًّا عن الرياضيات، وبصفةٍ خاصة عن كيفية تناول وجهات النظر المتباينة حول قطة شرودنجر. سنعود الآن إلى صورة قطة شرودنجر لكن في إطار معاملي العددين المركبين w وz (شكل ٢-٩ القسم أ). ينقسم الفوتون إلى الحالتين، وإذا كنا من الجادين في التعامل مع ميكانيكا الكم فنحن نعتقد أن متجه الحالة واقعي، ومن ثم نعتقد أيضًا أن القطة لا بد أن تكون بالضرورة في نوع ما من تراكب حالتي الحياة والموت معًا. ومن المناسب جدًّا تمثيل هاتين الحالتين باستخدام أقواس ديراك، كما هو موضح في الشكل (٢-٩) القسم (ب). في الواقع، نستطيع وضع القطط وكذلك الرموز داخل أقواس ديراك! والقطة ليست هي القصة بأكملها لأنه يوجد أيضًا المسدس والفوتون والهواء المحيط، والبيئة أيضًا؛ فكل عنصر من عناصر الحالة هو في الواقع نتيجة تجميع كل هذه التأثيرات معًا، لكن ما زال لدينا تراكب (شكل ٢-٩ القسم ب).



شكل ٢-٩

السؤال الآن هو: كيف يتلاءم تصور وجود «كونين» مع هذا الوضع؟ في هذا الصدد، يمكن أن يرى شخص ما هذه القطة وينظر إليها بإمعان، مما يدفعك إلى أن تسأل عن سبب عدم رؤية هذا الشخص لتراكبي حالتي القطة. حسنًا، يستطيع الأشخاص المعتقدون في وجود كونين أن يصفوا الوضع كما هو موضح في الشكل (٢-٩) القسم (ج). فهناك حالة واحدة لقطة حية، مرتبطة برؤية الشخص وإدراكه لقطة حية، وهناك أيضًا حالة أخرى لقطة ميتة، مرتبطة بشخص يشاهد قطة ميتة. وهذان البديلان



شكل ٢-١٠

يتراكبان: ففي داخل أقواس ديراك، وضعت الحالات العقلية كما هي تمامًا للشخص الذي يراقب القطة في كل من هاتين الحالتين، ويعكس تعبير الشخص الحالة العقلية للفرد. لذلك، فإن وجهة نظر من يعتقد بوجود كونين هي أن هناك نسخًا مختلفة للشخص الذي يرى القطة، لكن هذه النسخ تعيش في «أكوان مختلفة». ربما تتخيل أنك إحدى هذه النسخ، لكن هناك نسخة أخرى منك في كون آخر مماثل لما تعيش فيه، تؤيد الاحتمال الآخر. وبطبيعة الحال، لا يُعد ذلك وصفًا دقيقًا للكون، لكنني أعتقد أن الأمر أكثر سوءًا من ذلك عند وصف الأكوان المتعددة. إن ما يسبب القلق لي ليس فقط عدم الدقة الكاملة لوصف الكون، حيث إن الخلل الأساسي يكمن في أن هذا الوصف لا يحل المشكلة في الواقع. على سبيل المثال، لماذا لا يتيح لنا وعينا إدراك أنواع التراكب الماكروسكوبية؟ دعونا نتناول الحالة الخاصة التي يكون فيها العددان المركبان w وz متساويين. بعد ذلك يمكنك إعادة صياغة هذه الحالة كما في الشكل (٢-١٠)، بمعنى إجراء عملية جمع للقطة الحية مع القطة الميتة لشخص يدرك أن القطة حية مع شخص يدركها ميتة، بالإضافة إلى طرح قطة ميتة من قطة حية لشخص يدرك أنها حية ناقص آخر يدركها ميتة. الآن يمكن أن تقول: «لا يمكنك إجراء ذلك، فهذا لا يماثل حالات الإدراك.» لكن لم لا؟ فنحن لا نعلم ما المقصود بالإدراك، ثم كيف لنا أن نعلم أن إحدى حالات الإدراك لا يمكنها إدراك قطة حية

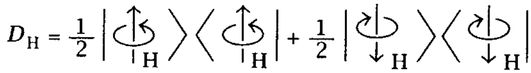
$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left|\uparrow_H\right\rangle\left|\downarrow_T\right\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}\left|\downarrow_H\right\rangle\left|\uparrow_T\right\rangle$$

الدوران الكلي

شكل ٢-١١

وقطة ميتة في الوقت نفسه؟ ودون أن نعلم ماهية الإدراك، وتكون لدينا نظرية جيدة عن سبب عدم وجود حالات الإدراك المختلطة هذه — الأمر الذي سنتطرق إليه بعد انتهاء الفصل الثالث — يبدو لي أن هذا لا يقدم أي تفسير عن سبب حدوث إدراك لإحدى الحالات أو الأخرى، وليس إدراك تراكب معين. ربما يمكن تحويل هذا الأمر إلى نظرية، لكن قد يتطلب ذلك الحصول على نظرية عن الإدراك أيضًا. وثمة اعتراض آخر متمثل في أنه إذا أتحنا للعددين w وz أن يكونا عددين عامين، فلن ينبئنا هذا عن سبب كون الاحتمالات هي نفسها التي نتجت عن ميكانيكا الكم، والتي توصلنا إليها بقاعدة المقاييس المربعة التي وصفتها قبل ذلك. وهذه الاحتمالات — رغم هذا — من الممكن اختبارها بدقة بالغة.

دعوني الآن أتحدث عن موضوع بعيد بعض الشيء عن محور حديثنا، وهو القياس الكمي، وسوف أتحدث فيه باستفاضة أكثر عن التشابك الكمي. في شكل (٢-١١)، قدمت وصفًا للتجربة EPR بالاستعانة بنسخة بوهم التي قلنا عنها من قبل إنها واحدة من ألغاز Z الكمية. والسؤال الآن هو: كيف نصف حالة اثنين من جسيمات نصف الدورة وهما يمضيان في اتجاهين؟ يساوي الدوران الكلي صفرًا، وبالتالي إذا استقبلنا جسيمًا يتجه دورانه لأعلى، لعلمنا أن الجسيم الآخر لا بد أن يكون دورانه لأسفل. وفي هذه الحالة تكون الحالة الكمية للمنظومة المتحدة نتاج الدوران المتجه لأعلى مضافًا إليه نظيره المتجه لأسفل. لكن إذا وجدنا أن أحد الدورانين يتجه لأسفل فلا بد أن يكون الدوران الآخر متجهًا لأعلى. (سيظهر هذان البديلان إذا اخترنا أن نفحص دوران الجسيم في الاتجاه لأعلى/لأسفل.) للحصول على الحالة الكمية للنظام بأكمله، علينا إضافة هذين البديلين أحدهما للآخر.

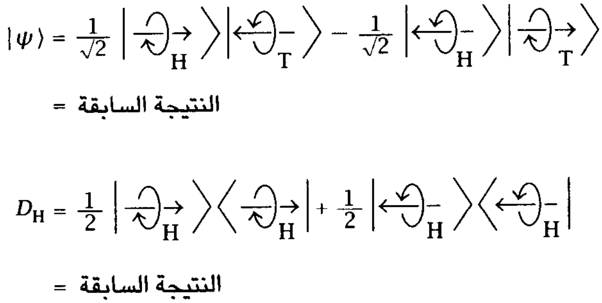


شكل ٢-١٢

وفي واقع الأمر، نحتاج لإشارة سالبة لنجعل مجموع الدوران الإجمالي لزوج الإلكترونات معًا يساوي صفرًا أيًّا كان الاتجاه الذي نختاره.

الآن افترض أننا ننوي إجراء قياس لدوران الجسيم القادم نحو المكشاف «هنا» على الأرض، مع افتراض أن الجسيم الآخر يمضي بعيدًا جدًّا — مثلًا، إلى القمر — وهكذا فإن «هناك» سيكون على القمر. لنتصور معًا أن معنا زميلًا على القمر يقيس الجسيم في الاتجاه لأعلى/لأسفل، ولدى هذا الشخص فرصة متساوية لاكتشاف أن الجسيم يتجه دورانه لأعلى أو لأسفل. فإذا وجد أن الدوران لأعلى إذن لا بد أن تكون حالة دوران الجسيم التابع لنا لأسفل. وإذا وجد أن الدوران لأعلى تكون حالة دوران الجسيم التابع لنا لأسفل. وبذلك أرى أن لمتجه الحالة الخاص بالجسيم الذي نحن بصدد قياسه مجموعة محتملة من الحالات ذات الفرص المتساوية فيما يتعلق بالدوران لأعلى والدوران لأسفل.

ثمة إجراء في ميكانيكا الكم للتعامل مع مجموعة الاحتمالات المماثلة، حيث يستخدم البعض كمية يُطلق عليها مصفوفة الكثافة. وفي واقع الأمر، نجد أن مصفوفة الكثافة التي أستخدمها هنا في هذا الموقف الحالي هي تلك المعروضة في الشكل (٢-١٢). ونجد أن القيمة 1/2 الأولى في هذا الشكل هي احتمال اتجاه الحركة الدورانية هنا لأعلى، أما القيمة 1/2 الثانية في الشكل تشير إلى احتمالية اتجاه الدوران لأسفل. وفي الواقع هذه مجرد احتمالات عادية تعبر عن عدم تأكدنا من حالة الدوران الفعلية للجسيم الذي نحن بصدد قياسه. والاحتمالات العادية هي مجرد أعداد حقيقية عادية (تنحصر بين 0 و1)، وعملية الاتحاد المشار إليها في الشكل (٢-١٢) ليست تراكبًا كميًّا، تُعتبر معاملاته أعدادًا مركبة، لكنها اتحاد مقاس بالاحتمالات. لاحظ أن الكميات المضروب فيها عامِلًا الاحتمالات (1/2) هي تعبيرات تشتمل



شكل ٢-١٣

على عامل للقوس الأول، يشير فيه قوس الزاوية إلى جهة اليمين — ويُسمى متجه كِت Ket (ديراك) — وكذلك عامل للقوس الثاني يشير فيه قوس الزاوية إلى اليسار — ويُسمى متجه برا bra — (ومتجه برا المُشار إليه هو العدد المرافق للعدد المركب لمتجه كِت).

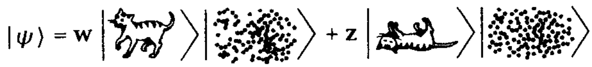
أعتقد أن هذا التوقيت مناسب لمحاولة شرح طبيعة الرياضيات التي يشتمل عليها تركيب مصفوفات الكثافة بأية درجة من التفصيل. ومن الكافي القول إن مصفوفة الكثافة تحتوي على كل المعلومات اللازمة لحساب احتمالات نتائج القياسات التي يمكن إجراؤها على جزء واحد من الحالة الكمية لنظام، حيث من المفترض أنه يتعذر التوصل إلى أية معلومات تتعلق بالجزء المتبقي من تلك الحالة. وفي مثالنا، تشير الحالة الكمية الكلية إلى زوج من الجسيمات معًا (أي أنها حالة تشابك) ونحن نفترض أنه لا توجد معلومات متاحة لنا «هنا»، تخص القياس الذي يمكن إجراؤه «هناك»، على القمر، على شريك الجسيم الذي نحن بصدد فحصه «هنا».

الآن، دعونا نُجْرِ تغييرًا طفيفًا للوضع ونفترض أن زميلنا على القمر يختار قياس دوران الجسيم عنده في اتجاه اليسار/اليمين وليس اتجاه أعلى/أسفل، ولهذا الاحتمال يكون استخدام وصف الحالة الموضح في الشكل (٢-١٣) هو الأكثر مناسبةً. في واقع الأمر، هذه الحالة هي نفسها الموضحة فيما سبق في الشكل (٢-١١)، وسوف يتضح هذا عند توظيف علم الجبر، بالاعتماد على هندسة الشكل (٢-٤)، إلا أن الحالة ممثلة بصورة مختلفة.

ولكننا ما زلنا لا نعلم النتيجة التي سيحصل عليها زميلنا على القمر فيما يتعلق بقياس الدوران (يسار/يمين)، لكننا نعلم أن الاحتمالية ستتمثل في الدوران لليسار بمقدار 1/2 — الحالة التي لا بد أن يكون الدوران فيها لليمين على الأرض — والدوران لليمين بمقدار 1/2 أيضًا — الحالة التي لا بد أن يكون الدوران فيها لليسار على الأرض — وطبقًا لذلك، تصبح مصفوفة الكثافة D_{H} مماثلة لتلك الموضحة في الشكل (٢-١٣)، فتصبح بذلك هي مصفوفة الكثافة نفسها التي أوضحناها من قبل في الشكل (٢-١٢). وبطبيعة الحال، هذا هو ما ينبغي التوصل إليه، حيث إن اختيار القياس المحدد الذي أقدم عليه زميلنا على القمر يجب ألا يؤدي إلى أي اختلاف في الاحتمالات التي حصلنا عليها من قياساتنا. (وإذا حدث اختلاف تمكن زميلنا على القمر من إرسال إشارات إلينا بسرعة أكبر من سرعة الضوء، حيث إن رسالته تتحول إلى أكواد بسبب اختياره لاتجاه قياس الدوران.)

نستطيع أيضًا استخدام علم الجبر مباشرةً لنرى أن مصفوفات الكثافة ستصبح كما هي دون تغيير. وإذا كان لدينا إلمام بهذا النوع من الجبر، فسوف نعرف ما أتحدث عنه الآن — وإن لم يكن الأمر كذلك فلا داعي للقلق — حيث إن أفضل وسيلة نستخدمها هي مصفوفة الكثافة إذا كان يوجد جزء معين من الحالة لا يمكن التوصل إليه. وتستخدم مصفوفة الكثافة الاحتمالات بالمعنى المعتاد، لكن مع دمجها بالوصف الميكانيكي الكمي الذي يشتمل ضمنيًّا على وجود احتمالات لميكانيكا الكم. إذا لم تكن لدينا أية معرفة بما يحدث «هناك»، فإن ذلك يكون أفضل وصف للحالة «هنا» أستطيع أن أقدمه.

مع ذلك فمن الصعب تقرير ما إذا كنت تتفق مع أن مصفوفة الكثافة تصف الواقع بالفعل أم لا. وتكمن المشكلة في أننا لا نعرف إن كنا لن نستطيع، فيما بعد، استقبال رسالة من القمر تخبرنا بأن زميلنا تمكن فعليًّا من قياس الحالة وحصل على النتيجة. علاوةً على ذلك، فنحن نعلم الحالة التي يجب أن يكون عليها الجسيم الذي لدينا بالفعل، ولكن لم تخبرنا مصفوفة الكثافة عن كل ما يخص هذه الحالة ولذلك نحتاج حقًّا

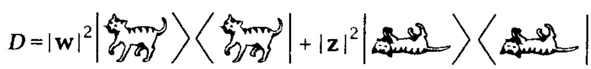


شكل ٢-١٤

لمعرفة الحالة الفعلية للزوج المتحد. ومن ثَمّ فإن مصفوفة الكثافة تعتبر نوعًا من الوصف المؤقت، وذلك هو السبب في تسميتها أحيانا FAPP (أي لكل الأغراض العملية).

في المعتاد لا تُستخدم مصفوفة الكثافة لوصف مواقف كهذه، في حين أنها تُستخدم لوصف مواقف مماثلة لما هو موضح في الشكل (٢-١٤)، حيث بدلًا من الحصول على حالة تشابك مقسمة بين ما يمكن أن نتوصل إليه «هنا» وما يتوصل إليه زميلنا «هناك» على القمر، تكون الحالة «هنا» متمثلة في قطة، إما ميتة أو حية، وتوفر الحالة «هناك» (التي ربما تكون بالكامل في الغرفة نفسها) حالة البيئة بأكملها التي تصاحب القطة. لذلك فإن بالإمكان أن تصبح لدينا قطة حية في بيئة معينة بالإضافة إلى قطة ميتة في بيئة أخرى، بالنسبة لمتجه حالة التشابك الكاملة. وما يقوله أصحاب مبدأ FAPP هو أننا لا نستطيع مطلقًا الحصول على معلومات كافية عن البيئة ولذلك لا نستخدم متجه الحالة؛ حيث يتعين علينا استخدام مصفوفة الكثافة (شكل ٢-١٥).

لذلك تعمل مصفوفة الكثافة وكأنها مزيج من الاحتمالات ويقول أنصار FAPP إن القطة — لكل الأغراض العملية — إما ميتة أو حية. قد يكون هذا صحيحًا «لكل الأغراض العملية»، لكنه لا يعطينا صورة عن الواقع؛ فإنه لا ينبئنا بما يمكن أن يحدث إذا جاء شخص بالغ المهارة فيما بعد وقال لنا كيف نستخلص المعلومات من البيئة. وإلى حد ما، تُعتبر وجهة النظر هذه مؤقتة، وذلك لأنها تُعد جيدة ما دام لا يوجد شخص قادر على الحصول على تلك المعلومات. ومع ذلك فيمكننا إجراء التحليل نفسه للقطة كما أجريناه على الجسيم في تجربة EPR. ولقد أوضحنا أنه لأمرٌ جيد استخدام حالتي الدوران لليسار واليمين، تمامًا كما هو من الجيد استخدام حالتي الدوران

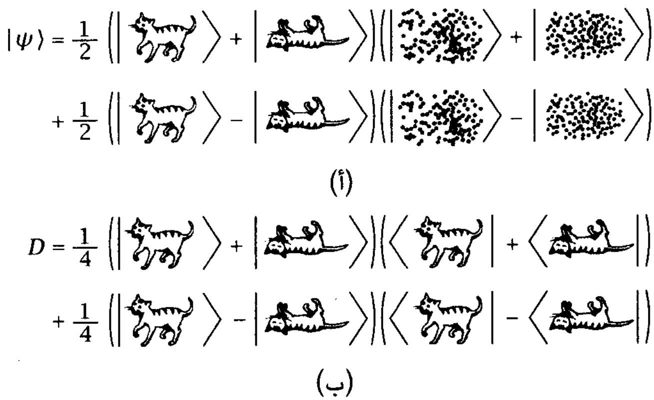


شكل ٢-١٥

لأعلى ولأسفل. ويمكننا تحقيق حالتي الدوران لليسار واليمين بالجمع بين حالتي الدوران لأعلى ولأسفل طبقًا لقواعد ميكانيكا الكم والحصول على متجه حالة التشابك الكلية نفسه لزوج الجسيمات — كما هو ممثَّل في الشكل (٢-١٣) القسم (أ) — ومصفوفة الكثافة نفسها، كما موضح في الشكل (٢-١٣) القسم (ب).

في حالة القطة وبيئتها (في الموقف الذي تكون فيه السعتان w وz متساويتين)، نستطيع تنفيذ الإجراء الرياضي نفسه، الذي تأخذ فيه «القطة الحية + القطة الميتة» الدوران جهة اليمين و«القطة الحية – القطة الميتة» الدوران جهة اليسار. وبذلك نحصل على الحالة نفسها كما في السابق (شكل ٢-١٤ وفيه w = z)، ومصفوفة الكثافة نفسها كما في السابق (شكل ٢-١٥ وفيه w = z). والسؤال الآن هو: هل تُعتبر حالة قطة حية + قطة ميتة أو قطة حية – قطة ميتة، على القدر نفسه من جودة حالة قطة حية أو قطة ميتة؟ حسنًا، لا يُعد ذلك واضحًا تمامًا، لكنّ الرياضيات أداة دقيقة. فيمكن أن تصبح مصفوفة الكثافة للقطة هي نفسها كما كانت فيما سبق (شكل ٢-١٦). لذلك فإن معرفة ماهية مصفوفة الكثافة لا تساعدنا في تحديد كون القطة حية أو ميتة فعليًّا. بعبارة أخرى، فإن حياة القطة أو موتها ليست متضمنة في مصفوفة الكثافة؛ فنحن نحتاج إلى المزيد.

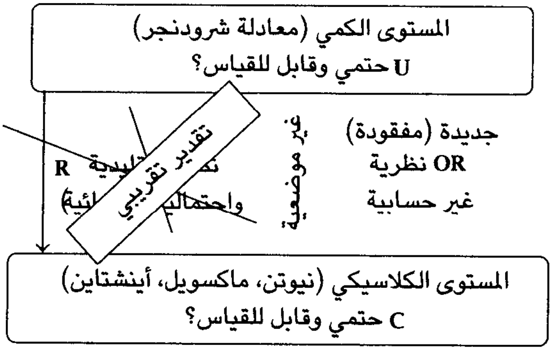
الجدير بالذكر أن ما سبق لا يشرح إطلاقًا السبب الفعلي لكون القطة حية أو ميتة (أو في حالة بينية بين الحياة والموت)، وليس هذا فقط بل إنه لا يشرح أيضًا سبب إدراكنا للقطة بوصفها إما حية أو ميتة. علاوةً على ذلك، فإنه في حالة السعتين العامتين w وz، لا يشرح التوضيح السابق لماذا يتمثل الاحتمالان النسبيان في $|w|^2$ و$|z|^2$. ووجهة نظري الشخصية أن هذا ليس مناسبًا بما يكفي، وفي الشكل التالي (شكل ٢-١٧) عمدت إلى



شكل ٢-١٦

عرض عالم الفيزياء بأكمله، لكني أجريت عدة تعديلات لتوضيح ما أعتقد بخصوص ما يتعين على الفيزياء إجراؤه مستقبلًا. والخطوة التي رمزت إليها بالحرف R في هذا الشكل هي تقدير تقريبي لشيء لم نتوصل إليه حتى الآن، وما لم نتوصل إليه رمزت إليه بالحرفين OR للدلالة على الاختزال الموضوعي objective reduction. فبالفعل إنه شيءٌ موضوعي — بمعنى أن حدثًا أو آخر وقع بصورة موضوعية — كما أنه يعبر عن نظرية مفقودة. في واقع الأمر، فإن للحرفين OR دلالة قوية من حيث إمكانية استخدامهما بمعنى «أو»؛ أي أن شيئًا يحدث أو آخر.

لكن متى تحدث تلك العملية؟ تنحصر وجهة النظر التي أدافع عنها في أن شيئًا ما يؤدي للخطأ في مبدأ التراكب عند تطبيقه على هندسات زمكان متباينة بشكل ملحوظ. ولقد التقينا بفكرة هندسات الزمكان في الفصل الأول، وفي الشكل (٢-١٨) القسم (أ) عرضٌ لاثنتين منها. بالإضافة إلى هذا، مثّلت تراكب هاتين الهندستين للزمكان في الشكل، تمامًا كما فعلنا في تراكب الجسيمات والفوتونات. وعندما نشعر أننا مجبرون على وضع عمليات تراكب حالات الزمكان المتباينة في الاعتبار، يظهر عدد كبير من المشكلات لأن المخاريط الضوئية في حالتي الزمكان يمكن أن تتجه في اتجاهين مختلفين.

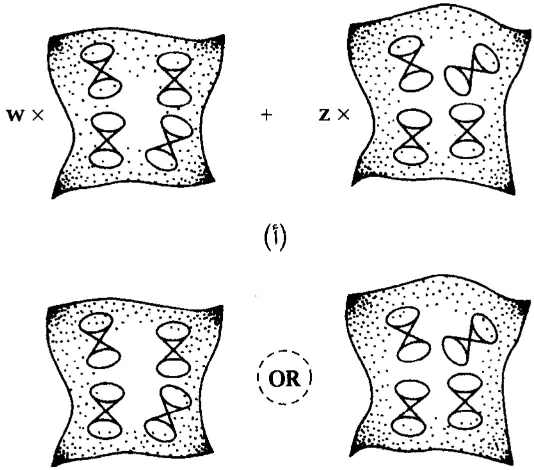


شكل ٢-١٧

وهذه واحدة من المشكلات الكبرى التي يواجهها الناس عندما يحاولون جادين تكميم النسبية العامة. وباءت محاولة تقديم الفيزياء في إطار هذا النوع من الزمكان المتراكب — في رأيي — بفشل كل شخص سعى لذلك حتى الآن.

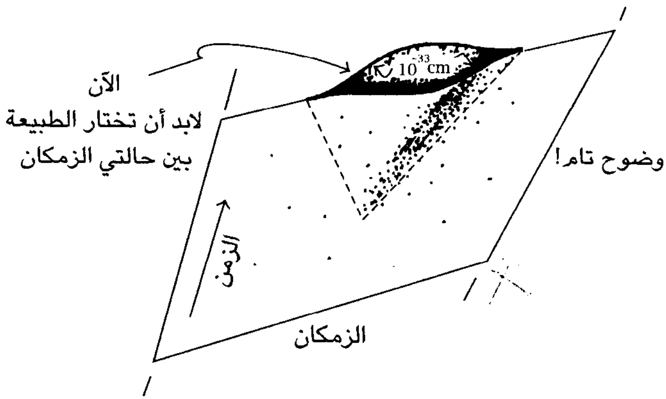
وما أقوله هو أنه توجد أسباب قوية وراء فشل كل من سعى لذلك؛ لأنه أمر يجب ألا يفعله أي شخص. وبطريقةٍ أو بأخرى، يصبح هذا التراكب بالفعل شيئًا محددًا أو آخر ويحدث هذا في مستوى الزمكان (شكل ٢-١٨ القسم ب). والآن، قد تقول: «هذا شيءٌ ممتاز مبدئيًّا، لكن عند محاولة الجمع بين ميكانيكا الكم والنسبية العامة، تواجهنا هاتان القيمتان المتمثلتان في زمن بلانك وطول بلانك، اللذين يقل حجمهما كثيرًا عن الأطوال والأزمان المعتادة التي نتعامل معها حتى في فيزياء الجسيمات، بالإضافة إلى أنه لا علاقة للأمر بما يخص مقاييس القطط والأفراد. لذلك، ماذا يمكن أن تفعله الجاذبية الكمية بخصوص هذا الشأن؟» في اعتقادي، أمامها الكثير جدًّا لتفعله بسبب الطبيعة الأساسية لما يحدث.

ما علاقة طول بلانك، البالغ 10^{-33} سنتيمتر، باختزال الحالة الكمية؟ يعبر الشكل (٢-١٩) عن صورة تخطيطية واضحة لزمكان في طريقه للانقسام إلى شعبتين، وهذا بالطبع يؤدي إلى تراكب حالتي زمكان، إحداهما يمكن أن تمثل القطة الميتة والأخرى تمثل القطة الحية. وبطريقةٍ أو



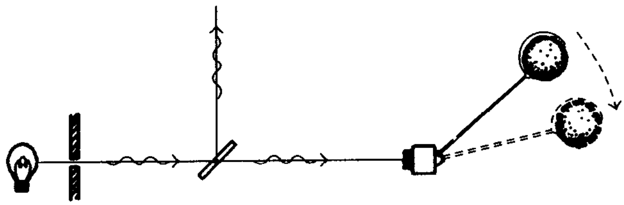
شكل ٢-١٨

بأخرى، يبدو أن هاتين الحالتين المختلفتين للزمكان في حاجة لأن يتراكبا، وهنا نتساءل: متى ستختلفان إحداهما عن الأخرى البعض بصورةٍ تكفي لأن يعترينا القلق بشأن ضرورة تغيير القواعد؟ تتمثل الإجابة في أنه علينا الانتظار حتى يصبح الفرق بين الهندستين فرقًا في مقدار طول بلانك. وعندما تبدأ الهندستان في الاختلاف بهذا القدر، يجب أن يعترينا القلق بشأن ما سنفعله، ومن ثم ينبغي أن تتغير القواعد. ويتعين عليّ أن أؤكد أننا هنا نتعامل مع حالات زمكان وليس مجرد أماكن. وأما «فصل مقياس بلانك للزمكان»، فإن الفصل المكاني الصغير ينطبق على زمن أطول، والفصل المكاني الأكبر ينطبق على زمن أقصر. وما نحتاج إليه هو معيار نتمكن عن طريقه من تقدير متى تختلف حالتا زمكان بشكل ملحوظ، وسوف يؤدي هذا إلى مقياس زمني لتختار الطبيعة بينهما. ومن ثَم، فإن وجهة النظر هذه تتمثل في أن الطبيعة تختار إحدى الحالتين طبقًا لقاعدة معينة لم نتوصل لفهمها بعد.



شكل ٢-١٩: ما علاقة طول بلانك، البالغ 10^{-33} سنتيمتر، باختزال الحالة الكمية؟ بصورةٍ تقريبية، عند وجود تحرك كافٍ للكتلة بين الحالتين الخاضعتين لتراكب مثل هذا، فإن حالتي الزمكان الناجمتين تختلفان بما يقرب من 10^{-33} سنتيمتر.

ما الفترة الزمنية اللازمة للطبيعة لتحديد الاختيار؟ نستطيع حساب مقياس الزمن في بعض المواقف الواضحة، عندما يؤدي التقدير التقريبي النيوتني لنظرية أينشتاين إلى النتائج المفترض تحقيقها، وعندما يوجد اختلاف محدد وواضح بين مجالي الجاذبية اللذين يخضعان للتراكب الكمي. (تتساوى سعتا العددين المركبين المتضمنين تقريبًا في الحجم.) والإجابة التي أقترحها أوضحها فيما يأتي، وسأستبدل القطة بكتلة، ولكن ما حجم هذه الكتلة وما المسافة التي ينبغي عليها أن تتحرك في نطاقها وما مقياس الزمن الناتج عند حدوث انهيار متجه الحالة (شكل ٢-٢٠)؟ في حقيقة الأمر، سوف أعتبر تراكب إحدى الحالتين بالإضافة إلى الحالة الأخرى حالة غير مستقرة، ويشبه ذلك إلى حدٍّ ما عملية انحلال جسيم أو نواة يورانيوم أو أي شيء مماثل لذلك، حيث ينحل إلى شيء أو آخر مصحوبًا بمقياس زمني لذلك الانحلال. وعدم استقرار الحالة هو مجرد افتراض، لكنّه إشارة ضمنية إلى الفيزياء التي لا نفهمها. ولاستنتاج مقياس الزمن، علينا أن نحسب



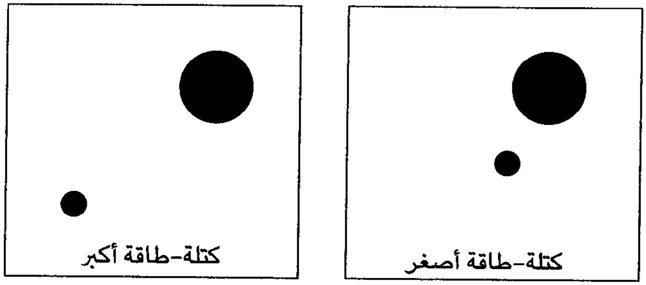
شكل ٢-٢٠: يمكن أن يشتمل القياس، بدلًا من القطة، على تحرك بسيط لكتلة كروية الشكل. ولكن ما حجم هذه الكتلة وإلى أي مدى لا بد أن تتحرك وما الزمن الذي يمكن أن يستمر فيه التراكب في الحدوث قبل اختزال متجه الحالة؟

الطاقة — المُشار إليها فيما يأتي بالحرف E — اللازمة لإزاحة نموذج واحد من الكتلة بعيدًا عن مجال جاذبية النموذج الآخر، ثم نحسب ثابت بلانك مقسومًا على 2π — المُشار إليه بالرمز $\hbar$ — ونقسمه على طاقة التجاذب، ليكون ذلك هو مقياس الزمن — المُشار إليه بالحرف T — للانحلال في هذا الموقف.

$$T = \frac{\hbar}{E}.$$

الجدير بالذكر أنه توجد نظم كثيرة تتبع هذا النوع العام من الاستنتاج؛ فكل نظم التجاذب العام تشترك في الملامح نفسها تقريبًا، مع أنها قد تختلف في التفاصيل.

ثمة أسباب أخرى وراء الاعتقاد في أن أي نظام تجاذب كهذا يُعتبر فعّالًا للغاية. من هذه الأسباب أن جميع النظم المحددة الأخرى لاختزال الحالة الكمية، التي تحاول حل مشكلة القياس الكمي عن طريق تقديم بعض الظواهر الفيزيائية الجديدة، تصطدم بمشاكل مع مسألة حفظ الطاقة. ومما لا شك فيه أن جميعنا يعرف أن القواعد المعتادة لحفظ الطاقة دومًا تُخترق، وربما تكون تلك هي الحال. لكن فيما يتعلق بنظم التجاذب، فيبدو لي أن ثمة فرصة ممتازة لأن نصبح قادرين على تجنب هذه المشكلة تمامًا،



شكل ٢-٢١: يشتمل إجمالي الكتلة-الطاقة لأي نظام تجاذب على إسهامات تجاذبية بحتة لا يمكن أن تكون موضعية.

ومع أنني لا أعرف كيفية إجراء هذا بالتفصيل، فدعوني أذكر ما يدور في عقلي.

في النسبية العامة، يُعتبر كل من الكتلة والطاقة من الكينونات الغريبة إلى حد ما. وبصفةٍ أساسية، تساوي الكتلة الطاقة (مقسومة على مربع سرعة الضوء) وبالتالي تسهم طاقة الوضع الخاصة بالتجاذب (سلبيًّا) في تكوّن الكتلة. طبقًا لذلك، إذا كان لدينا كتلتان بينهما مسافة كبيرة، تكون كتلة المنظومة بأكملها أكبر قليلًا عما إذا كانت المسافة بينهما صغيرة (شكل ٢-٢١). مع أن كثافتي الكتلة-الطاقة (كما قيستا بواسطة تنسور الطاقة-كمية الحركة) تكونا غير صفريتين فقط في إطار الكتلتين ذاتيهما، ولا يكون مقدار كل منهما معتمدًا بشكل ملحوظ على وجود الكتلة الأخرى، فإنه يوجد فرق بين إجمالي الطاقتين في الحالتين الموضحتين في الشكل (٢-٢١)، ولا تكون الطاقة الكلية موضعية. وفي الواقع تظهر اللاموضعية في الطاقة بصورة أساسية في إطار النسبية العامة. وهذا بالتأكيد هو ما يحدث في المثال الشهير لمولد النبضات الثنائي الذي ذكرته في الفصل الأول، حيث تحمل موجات التجاذب الطاقة الإيجابية والكتلة بعيدًا عن النظام، لكن تستقر هذه الطاقة لاموضعيًّا في أرجاء الفضاء. تُعتبر طاقة التجاذب أمرًا محيرًا، ويبدو لي أنه إذا كان لدينا الوسيلة المناسبة للدمج بين النسبية العامة وميكانيكا الكم، فستغدو هناك فرصة جيدة لتجنب المشكلات المصاحبة

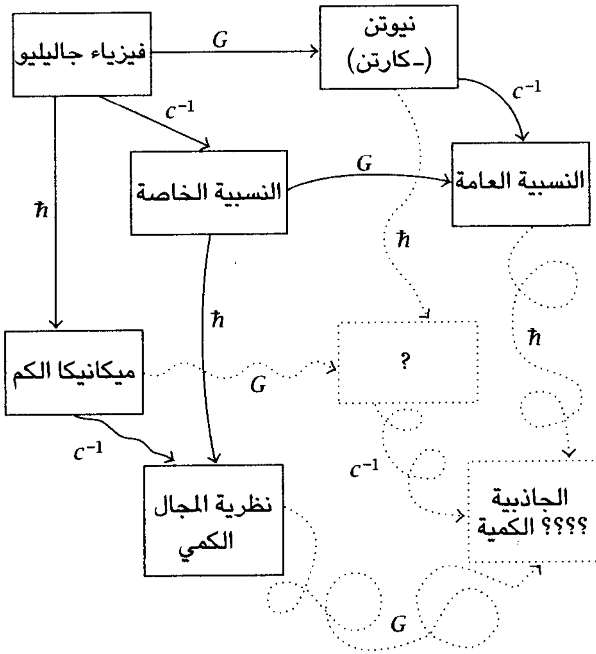
للطاقة التي تتسبب في إفساد نظريات انهيار متجه الحالة. والواقع أنه في الحالة المتراكبة، يجب علينا أن نضع في الاعتبار الإسهام التجاذبي للطاقة في التراكب. لكننا لا نستطيع حقيقةً تحديد إدراك موضعي للطاقة بالنسبة للجاذبية، ومن ثَم يوجد شك رئيسي في طاقة التجاذب، وهذا الشك يكون في نظام الطاقة E الموضحة سابقًا. وهذا أمر من الأمور التي نصادفها مع الجسيمات غير المستقرة، التي يصاحبها شك في الكتلة–الطاقة الخاصة بها، ويرتبط هذا الشك بفترة عمرها بهذه الطريقة نفسها.

سأنهي الآن حديثي هذا بتدقيق النظر في المقاييس الزمنية المحددة التي تبرز في المنهج الذي أناصره، وسوف أعود لهذا الموضوع في الفصل الثالث. والسؤال الآن هو: ما أزمنة انحلال المنظومات الحقيقية التي تحدث فيها حالات تراكب الزمكان هذه؟ بالنسبة لبروتون (باعتباره شكلًا كرويًّا جامدًا مؤقتًا)، يكون المقياس الزمني عدة ملايين من السنين، وذلك أمر جيد لأننا نعلم من تجارب مقياس التداخل على الجسيمات المفردة أننا لا نرى حدوث هذا الأمر. وإذا أخذنا قدرًا بالغ الضآلة من الماء، بنصف قطر 10^{-5} سنتيمتر مثلًا، يصبح زمن الانحلال عدة ساعات، وإذا كان نصف القطر ميكرونًا واحدًا، يكون زمن الانحلال جزءًا من عشرين جزءًا من الثانية، وإذا بلغ نصف القطر جزءًا من ألف جزء من السنتيمتر، لوصل زمن الانحلال إلى جزء من مليون جزء من الثانية. ولذلك فإن هذه الأرقام تدل على نوعية المقاييس التي تُعتبر الفيزياء — محل التركيز هنا — أكثر أهمية منها.

بالإضافة إلى كل ما سبق، فإن ثمة مقومًا إضافيًّا أساسيًّا ينبغي عليّ أن أذكره هنا، ومع أنني لم أكن أتعامل مع وجهة النظر الخاصة بـ FAPP — أو مبدأ «لكل الأغراض العملية» — على نحو جاد، فإنها تنطوي على عنصر غاية في الأهمية، وهو البيئة. وفي المطلق، تُعد البيئة من الأمور المهمة في محور حديثنا هذا وقد تجاهلته في مناقشاتي السابقة لحد بعيد، لذلك ينبغي علينا التعامل معها بجدية أكثر. ويتعين ألّا نضع في الاعتبار الكتلة المتراكبة مع الأخرى فقط، بل الكتلة في بيئتها المحيطة المتراكبة مع

الكتلة الأخرى في بيئتها المحيطة أيضًا. ويجب أن ننظر بعناية لنرى هل التأثير الأكبر يكمن في اضطراب البيئة المحيطة أم في حركة الكتلة. وإذا كان في البيئة المحيطة، لكان التأثير عشوائيًّا ولن نحصل على أية نتيجة مختلفة عن الإجراءات القياسية. وإذا كان النظام معزولًا بقدر كافٍ بحيث لا يتضمن البيئة المحيطة، فسوف نرى شيئًا مختلفًا عن ميكانيكا الكم القياسية. وسيكون من المثير لحد بالغ معرفة إن كان ممكنًا اقتراح تجارب منطقية — وشخصيًّا، أعرف تجارب لها احتمالات غير نهائية — يمكنها اختبار هل هذا النوع من النماذج ذا طبيعة حقيقية أو هل ميكانيكا الكم التقليدية ستعود للحياة مرة أخرى. ويتعين علينا حقًّا أن نضع في الاعتبار أن هذه الكتل — أو حتى القطط — لا بد أن تظل في حالات التراكب هذه.

دعوني أحاول في شكل (٢-٢٢) تلخيص ما نسعى إلى أن نفعله. في هذا الشكل، وضعت النظريات المتعددة في زوايا مكعب مشوه، تتطابق محاوره الثلاثة مع أهم الثوابت الثلاثة الرئيسية في الفيزياء: ثابت الجاذبية G (المحور الأفقي) وسرعة الضوء محسوبة عكسيًّا c^{-1} (المحور القطري)، وثابت ديراك-بلانك $\hbar$ (المحور الرأسي المتجه لأسفل). ويُعد كل ثابت من هذه الثوابت بالغ الصغر في المعتاد، ويمكن أن يساوي الصفر بالتقريب. وإذا ساوت الثوابت جميعها الصفر، نحصل على ما أسميته فيزياء جاليليو (في اليسار لأعلى). أما ثابت الجاذبية غير الصفري فينقلنا أفقيًّا تجاه نظرية الجاذبية لنيوتن (الذي قدم كارتان صيغتها الهندسية للزمكان لاحقًا). وإذا ما جعلنا الثابت c^{-1} غير صفري، لحصلنا على نظرية النسبية الخاصة لكل من بوانكاريه وأينشتاين ومينكوفسكي. ويكتمل المربع العلوي للمكعب المشوَّه إذا كان الثابتان غير صفريين، ومن ثَم نحصل على نظرية النسبية العامة لأينشتاين. ومع ذلك، فإن هذا التعميم على أية حال يُعد مباشرًا، وقد أوضحت هذه الحقيقة في الشكل (٢-٢٢) من خلال التشوهات الظاهرة في المربع الأعلى. وإذا كان الثابت $\hbar$ غير صفري لكن في ظل الرجوع إلى الحالة $G = c^{-1} = 0$، نحصل على ميكانيكا الكم القياسية. ومن خلال التعميم المباشر غير التام، يمكن تضمين الثابت c^{-1} أيضًا فنحصل على نظرية



شكل ٢-٢٢

المجال الكمي. وبهذا نستكمل الوجه الأيسر للمكعب، حيث ترمز التشوهات البسيطة إلى نقص المباشرة.

قد نعتقد أن كل ما يتعين علينا عمله الآن هو استكمال المكعب وبالتالي نعرف كل شيء. ومع ذلك، فقد ثبت أن مبادئ الفيزياء التجاذبية تقع في تناقض أساسي مع نظيراتها في ميكانيكا الكم، ويظهر هذا بوضوح حتى مع جاذبية نيوتن (التي يبقى فيها الثابت c^{-1} مساويًا للصفر) عندما نستخدم الإطار الهندسي المناسب (لكارتان)، الذي يُستخدم فيه مبدأ التكافؤ لأينشتاين (الذي طبقًا له يتعذر تمييز مجالات الجاذبية للثوابت عن تسارع الجاذبية). وقد لفت نظري إلى ذلك جوي كريستيان Joy Christian الذي ألهمني أيضًا عند تصميم الشكل (٢-٢٢). وحتى الآن، لم يظهر للنور أي اتحاد مناسب بين ميكانيكا الكم والجاذبية النيوتنية، التي تضع في

الاعتبار مبدأ التكافؤ لأينشتاين، كما حدث في النظرية الكلاسيكية بواسطة هندسة كارتان. وفي رأيي الخاص، لا بد أن يتلاءم هذا الاتحاد مع ظاهرة اختزال الحالة الكمية، بما يتناسب على وجه التقريب مع أفكار **OR** التي عرضتها من قبل في هذا الفصل. وبوضوح، ستكون عملية الاتحاد هذه أكثر من مباشرة في استكمالها للوجه الخلفي للمكعب الوارد بالشكل (٢-٢٢). والنظرية الكاملة — التي تدمج الثوابت الثلاثة معًا $\hbar$ وG وc^{-1} والتي تكتمل فيها أوجه المكعب كافة — لا بد وأنها ستكون أكثر من ممتازة ومتطورة رياضيًّا، وهذا بالطبع أمرٌ متروكٌ للمستقبل.

الفصل الثالث

الفيـزياء والعقـل

اختص الفصلان السابقان بالعالَم الفيزيائي والقواعد الرياضية التي نستخدمها لوصفه ومدى دقتها والغرابة التي تبدو عليها أحيانًا. وفي فصلنا هذا، سوف أتحدث عن العالم العقلي mental world، وبشكل خاص، عن مدى ارتباطه بالعالم الفيزيائي. وأفترض في هذا السياق أن الأسقف بيركيلي Bishop Berkeley لا بد أنه كان يفكر أنه بطريقةٍ ما ينبثق العالم الفيزيائي من عالمنا العقلي، في حين أن وجهة النظر العلمية الأكثر اعتيادًا تتمثل في أن العقلية إلى حدٍّ ما هي إحدى خصائص نوع معين من التركيب الفيزيائي.

وقد أدخل بوبر Popper عالمًا ثالثًا يسمى عالم الثقافة — الشكل (٣-١)، وهو يرى أن هذا العالم نتاج العقلية، ومن ثم فقد كان لديه سلسلة تدرجية من العوالم كما هو موضح في الشكل (٣-٢). وفي هذه الصورة، يرتبط العالم العقلي، بطريقة ما، بالعالم الفيزيائي (وقد يكون أيضًا نشأ منه)، وإلى حد ما، نشأت الثقافة من العقلية.

والآن، أريد أن أعالج الأشياء بطريقةٍ مختلفة بعض الشيء عما سبق. وذلك، حيث بدلًا من التفكير، كما فعل بوبر، في أن الثقافة قد نشأت من عقليتنا، أفضل أن أعتقد أن العوالم متصلة بعضها ببعض كما هو موضح في الشكل (٣-٣). بالإضافة إلى ذلك، فإن «العالم الثالث»، الذي سبقت الإشارة إليه، ليس هو حقًّا عالم الثقافة، لكنه عالم المطلقات الأفلاطونية، خاصةً الحقيقة الرياضية المطلقة. بهذه الطريقة، فإن الترتيب الذي ظهر

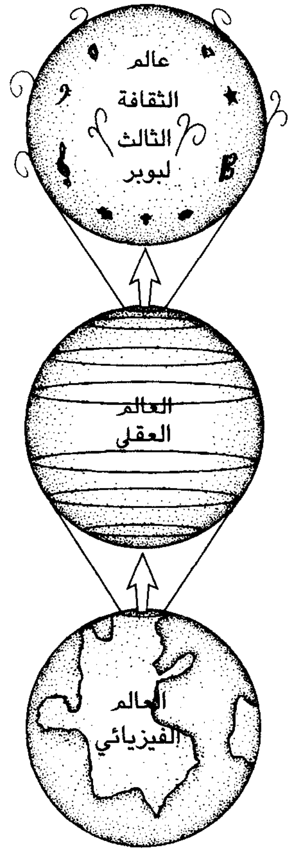


شكل ٣-١: عالم الثقافة الثالث لبوبر.

به الشكل (١-٣) في الفصل الأول، الذي يوضح الاعتماد العميق للعالم الفيزيائي على قوانين رياضية دقيقة، قد ضمنته في هذا الشكل.

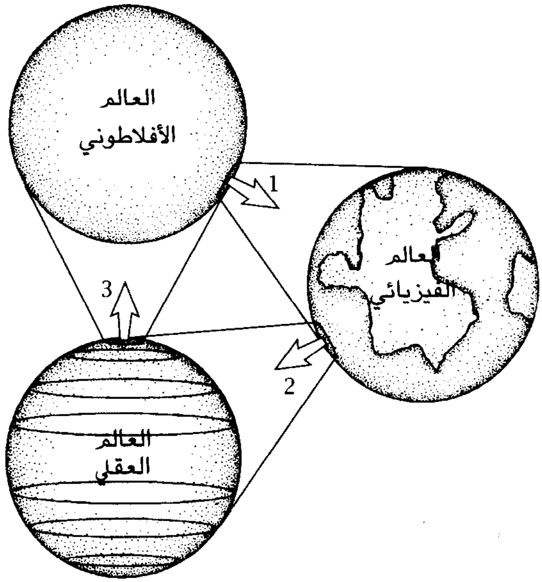
سوف يتناول جزء كبير من هذا الفصل العلاقة بين جميع هذه العوالم المتباينة. ويبدو لي أن هناك مشكلة أساسية تتعلق بالفكرة التي تقول إن العقلية تنشأ من الفيزياء، وهذا أمر يعرب الفلاسفة عن قلقهم بشأنه لأسباب منطقية للغاية. إن ما نتحدث عنه في الفيزياء هو المادة والكينونات الفيزيائية والأجسام الضخمة والجسيمات والمكان والزمان والطاقة ... إلخ. ولكن، كيف يمكن أن ترتبط مشاعرنا وإدراكنا للألوان أو للسعادة بالفيزياء؟ في الواقع، إنني أنظر إلى هذا الأمر باعتباره لغزًا، كما أننا نستطيع أيضًا أن نعتبر الأسهم التي تربط بين العوالم المختلفة في شكل (٣-٣) ألغازًا. في الفصلين السابقين طرحت للنقاش العلاقة بين الرياضيات والفيزياء (وهذا هو اللغز الأول)، وأشرت إلى ملاحظات فاجنر الخاصة بتلك العلاقة؛ فهو ينظر إليها باعتبارها علاقة فائقة للعادة وأنا أوافقه في هذا الرأي. ولكن، لماذا يبدو العالم الفيزيائي وكأنه يذعن للقوانين الرياضية بهذه الطريقة شديدة الدقة؟ ليس ذلك فقط، بل إن الرياضيات — التي تبدو وكأنها تتحكم في عالمنا الفيزيائي — تُعتبر مثمرة وفعّالة على نحو استثنائي، ببساطة بوصفها رياضيات. وأنا شخصيًّا، أنظر لهذه العلاقة كلغز عميق.

في هذا الفصل، سوف أوضح اللغز الثاني، وهو لغز العلاقة بين العالم الفيزيائي والعالم العقلي. لكن في هذا الصدد، علينا أن نضع في الاعتبار



شكل ٣-٢

أيضًا اللغز الثالث المتمثل في السؤال الآتي: ما الذي يشكل أساس قدرتنا على التوصل إلى الحقيقة الرياضية؟ عندما أشرت إلى العالم الأفلاطوني في الفصلين السابقين، كنت أتحدث بصفةٍ أساسية عن الرياضيات والمفاهيم الرياضية التي ينبغي لنا أن ننشدها لوصف العالم الفيزيائي. بالإضافة إلى ذلك، يراودنا إحساس بأن الرياضيات المطلوبة لوصف هذه الأشياء ليست من النوع التقليدي. مع ذلك، فإن هناك شعورًا عامًا بأن هذه التراكيب



شكل ٣-٣: ثلاثة عوالم وثلاثة ألغاز.

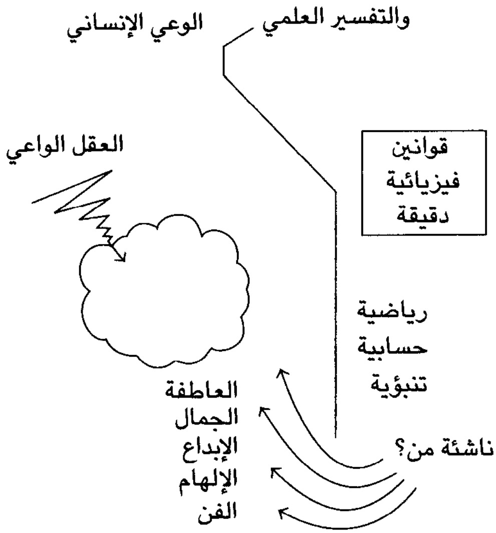
الرياضية هي نتائج عقليتنا؛ أي أن الرياضيات تُعد نتاج العقل البشري. وفي الواقع، يمكن أن ننظر للأمور بهذه الطريقة، لكنها ليست طريقة العالِم الرياضي في النظر إلى الحقيقة الرياضية، كما أنها ليست طريقتي أيضًا لفعل ذلك. لذا، ومع وجود سهم يربط بين العالم العقلي والعالم الأفلاطوني، فأنا لا أقصد الإشارة إلى أن هذا السهم — أو أيًّا من الأسهم الأخرى بالفعل — يعني أن أيًّا من هذه العوالم ينشأ ببساطة من أي من العوالم الأخرى. ومع أنه ربما يكون من المنطقي أن تكون هذه العوالم ناشئة بعضها من بعض، فإن المقصود من الأسهم ببساطة تمثيل حقيقة أن ثمة علاقة بين العوالم المتباينة.

الحقيقة الأكثر أهمية من كل ما سبق أن الشكل (٣-٣) يمثل ثلاثة من آرائي الشخصية التي أناصرها؛ أحدها أن العالم الفيزيائي في مجمله يمكن وصفه بصفةٍ أساسية بلغة الرياضيات. ولا أقول في هذا الصدد إن

الرياضيات بأكملها يمكن استخدامها في وصف الفيزياء، حيث ما أقصده هو أنه، إذا اخترنا الأجزاء المناسبة من الرياضيات، فإن بوسعها أن تصف العالم الفيزيائي بدقة بالغة، وبالتالي فإن العالم الفيزيائي يعالج الأمور طبقًا للرياضيات. لذلك، فإن هناك جزءًا صغيرًا من العالم الأفلاطوني يشمل عالمنا الفيزيائي. وبالمثل، لا أقول أيضًا إن كل ما في العالم الفيزيائي يمتلك عقلية، حيث إنني أقترح أنه لا توجد أشياء عقلية تتحرك من حولنا ليس لها أساس فيزيائي، وهذا هو رأيي الثاني الذي أناصره. وثمة رأي ثالث متمثل في أنه، في إطار فهمنا للرياضيات على الأقل فيما يتعلق بالأسس القائمة عليها، تستطيع عقليتنا أن تتعامل مع أي موضوع فردي في العالم الأفلاطوني بطريقة ما. وفي الواقع، قد يعتري بعض الناس القلق بخصوص هذا الرأي الثالث، وفي حقيقة الأمر قد يعتريهم القلق من الآراء الثلاثة كافة. ولهذا ينبغي أن أذكر أنه بعد أن رسمت هذا الشكل فقط، أيقنت أنه يعكس هذه الآراء الثلاثة مجتمعة، وسوف أعود لهذا الشكل في ختام هذا الفصل.

لأتحدث قليلًا الآن عن الوعي الإنساني، وبصفةٍ خاصة، هل يُعد هذا موضوعًا ينبغي لنا أن نفكر فيه في سياق التفسير العلمي؟ تتمثل وجهة نظري الشخصية في أننا يتعين علينا فعل ذلك إلى حدٍّ بعيد. وبصورةٍ خاصة، أعتقد أنني قد تعاملت مع السهم الذي يصل العالم الفيزيائي بالعالم العقلي بجدية بالغة. وبعبارة أخرى، أرى أن أمامنا تحديًا لفهم العالم العقلي في إطار العالم الفيزيائي.

في الشكل (٣-٤) الآتي، استطعت تلخيص بعض خصائص العالمين الفيزيائي والعقلي. في الجانب الأيمن من الشكل، نرى خصائص العالم الفيزيائي — الذي يدركه البعض باعتباره محكومًا بقوانين رياضية فيزيائية دقيقة — كما سبق مناقشته في الفصلين الأول والثاني. وإلى الجانب الأيسر، نرى الوعي الذي ينتمي إلى العالم العقلي الذي كثيرًا ما تتكرر فيه كلمات مثل «نفس» و«روح» و«دين» ... وهكذا. الجدير بالذكر أن الناس في هذه الأيام يفضلون التفسيرات العلمية للأشياء، علاوةً على أنهم يميلون للتفكير في أن بإمكانهم، بصفةٍ أساسية، إدراج أي وصف علمي على جهاز الكمبيوتر.



شكل ٣-٤

وطبقًا لذلك، إذا كان لدينا وصف رياضي لشيء ما، فإنه ينبغي لنا، من حيث المبدأ، أن نكون قادرين على إدراجه على جهاز كمبيوتر. وهذا أمر سوف أناقشه معارضًا له بقوة في هذا الفصل، على الرغم من نزعتي كفيزيائي.

ورد في الشكل (٣-٤) مصطلحان يصفان القوانين الفيزيائية، وهما «تنبؤية» و«حسابية» — وهذان المصطلحان يخصان إمكانية وجود حتمية في القوانين الفيزيائية أم لا أو هل نستطيع استخدام جهاز كمبيوتر من أجل محاكاة عمل هذه القوانين أم لا. فمن ناحية، ثمة وجهة نظر تقول إن الأشياء العقلية مثل العاطفة والجمال والإبداع والإلهام والفن هي أمثلة لأشياء يصعب رؤية نشأتها من أي من أنواع الوصف الحسابي. ومن الناحية «العلمية» الأخرى، قد يقول بعض الناس: «إننا مجرد أجهزة كمبيوتر؛ فنحن ربما لا نعرف كيف نصف هذه الأشياء حتى الآن، لكن بطريقة ما، إذا عرفنا الأنواع الملائمة للحسابات المفترض إجراؤها، قد نغدو قادرين على وصف كل الأشياء العقلية المدونة في الشكل (٣-٤).» وفي واقع

الأمر، تُستخدم كلمة «النشأة» غالبًا لوصف هذه العملية؛ حيث إن هذه الخصائص «تنشأ»، طبقًا لهؤلاء الناس، كنتيجة لاختيار النمط المناسب من الأعمال الحسابية.

ما المقصود بالوعي؟ في الواقع، إنني لا أعرف كيف يمكن تعريفه، وفي اعتقادي أن هذه اللحظة ليست مناسبة لمحاولة تعريف الوعي، نظرًا لأننا لا نعرف ماهيته. لكنني أعتقد أنه مفهوم يمكن التعرف عليه فيزيائيًّا وسأقدم له وصفًا الآن، مع أن محاولة تعريفه سينتج عنها تعريف للشيء الخطأ. في حقيقة الأمر، يبدو لي أنه يوجد على الأقل وجهان مختلفان للوعي. من ناحية، توجد جوانب سلبية للوعي، تتضمن الإدراك، ويمكننا استخدام هذه الفئة لإدراج أشياء، مثل: إدراك الألوان وتوافق الأشياء بعضها مع بعض واستخدام الذاكرة، وهكذا. وعلى الجانب الآخر، توجد جوانب فعّالة للوعي، تتضمن مفاهيم، مثل: الإرادة الحرة وإجراء المطلوب منا تنفيذه في ظل إرادتنا الحرة، واستخدام هذه المصطلحات يعكس أوجهًا متباينة لوعينا.

سوف أركز هنا بصفة أساسية على شيء آخر يشتمل على الوعي إلى حد بعيد، ويختلف عن الجانبين السلبي والفعّال للوعي، وربما يكون شيئًا في مكان ما بينهما. وفي الواقع، أود أن أشير إلى هذا الشيء باستخدام مصطلح «الفهم» أو ربما «البصيرة»، التي تُعد غالبًا كلمة أفضل. وأنا لن أعرف هذين المصطلحين؛ فأنا لا أعرف معناهما. وفي الواقع، هناك كلمتان أخريان لا أفهمهما؛ هما «الوعي» و«الذكاء». حسنًا، قد يتبادر إلى ذهنك السبب وراء تحدثي عن أشياء لا أعرف معناها حقًّا، وفي الواقع، ربما يكمن هذا السبب في أنني عالِم رياضيات، وعلماء الرياضيات لا يأبهون كثيرًا بذلك النوع من الأمور، فهم لا يحتاجون إلى تعريفات دقيقة لأشياء يستخدمونها، بشرط أن يكونوا قادرين على توضيح العلاقات بينها. وفي هذا الصدد، هناك نقطة أساسية تتمثل في أنه يبدو لي أن الذكاء شيء يتطلب الفهم، واستخدام مصطلح «الذكاء» في سياق ننكر فيه وجود أي فهم، يبدو لي أمرًا غير منطقي. وبطريقةٍ مماثلة، فإن الفهم دون أي وعي هو نوع من الهراء، إذ يتطلب الفهم نوعًا ما من الوعي، وتلك أيضًا نقطة أساسية أخرى كنت

جدول ٣-١

(أ)	يُعتبر التفكير في مجمله عملية حسابية — وبصورة خاصة — تُستدعى مشاعر الإدراك الواعي من خلال إجراء العمليات الحسابية المناسبة.
(ب)	يُعد الوعي سمة من سمات النشاط الفيزيائي للمخ، ومع أن أي نشاط فيزيائي يمكن محاكاته حسابيًّا، فإن المحاكاة الحسابية في حد ذاتها لا يمكنها استدعاء الوعي.
(ج)	بإمكان النشاط الفيزيائي المناسب للمخ استدعاء الوعي، لكن هذا النشاط الفيزيائي لا يمكن حتى محاكاته حسابيًّا على نحو مناسب.
(د)	لا يمكن تفسير الوعي فيزيائيًّا أو حسابيًّا أو بأي أسلوب علمي آخر.

أود التحدث عنها. وبالتالي، فإن ذلك يعني أن الذكاء يستلزم الوعي، ومع أنني لا أقدم تعريفًا لأي من هذين المصطلحين، فيبدو لي أنه من المنطقي الإصرار على وجود علاقات بينهما.

وثمة وجهات نظر متعددة يمكن أن نأخذ بها حول العلاقة بين التفكير الواعي وعملية الحساب. وفي الجدول (٣-١)، أقدم تلخيصًا لأربع مقاربات للوعي، مستخدمًا لها الحروف (أ) و(ب) و(ج) و(د).

ووجهة النظر التي أعطيتها الحرف (أ)، التي تُسمى أحيانًا الذكاء الاصطناعي القوي أو الوظيفية (الحسابية)، تؤكد أن التفكير في مجمله هو ببساطة تنفيذ لبعض الحسابات وبالتالي، إذا أجرينا العمليات الحسابية المناسبة كان الوعي هو النتيجة.

طبقًا لوجهة النظر الثانية — المُشار إليها بالحرف (ب) — فإن بوسعنا بصفةٍ أساسية محاكاة نشاط المخ، عندما يكون صاحبه واعيًا بشيء ما. ويتمثل الفرق بين المقاربة (أ) والمقاربة (ب) في أنه مع إمكانية محاكاة نشاط المخ، فإن تلك المحاكاة لا يمكنها في حد ذاتها، طبقًا للمقاربة (ب)، أن تمتلك أي مشاعر أو وعي؛ فثمة شيء آخر يحدث، ربما يتعلق بالتركيب الفيزيائي للشيء. لذلك، فإن المخ المشتمل في تركيبه الأساسي على الخلايا العصبية وغيرها سيُتاح له أن يكون واعيًا، في حين أن أية محاكاة لنشاط

هذا المخ لن تكون واعية. وبقدر استطاعتي على التوضيح، تلك هي وجهة النظر التي دعمها جون سيرل John Searle.

تتمثل المقاربة الثالثة (ج) في وجهة نظري التي طبقًا لها وللمقاربة (ب)، يوجد شيء في النشاط الفيزيائي للمخ يستدعي الوعي — وبعبارة أخرى، يوجد شيء في الفيزياء يتعين علينا أن نلتفت إليه — لكن هذا النشاط الفيزيائي يُعد شيئًا لا يمكن محاكاته، حتى حسابيًّا. فلا توجد أية محاكاة نستطيع إجراءها لذلك النشاط، ويتطلب هذا ضرورة وجود شيء في النشاط الفيزيائي للمخ خارج نطاق العمليات الحسابية.

في النهاية نصل إلى وجهة النظر (د) التي طبقًا لها، يكون من الخطأ التعامل مع هذه القضايا في إطار العلم بصورة مطلقة. وربما لا يمكن تفسير الوعي بمصطلحات علمية.

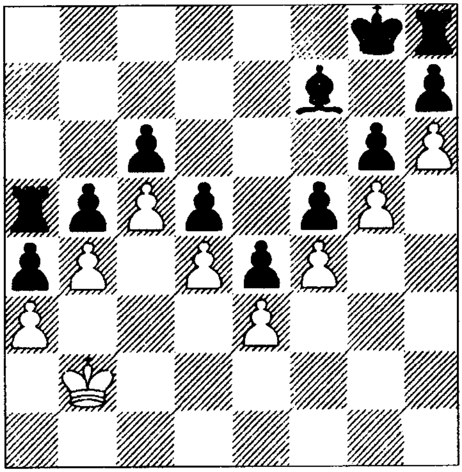
مما سبق يتضح أنني من المناصرين بقوة لوجهة النظر (ج)، مع أنه يوجد أنواع متعددة من وجهة النظر هذه. فثمة ما يمكن أن يُطلق عليه «وجهة النظر (ج) الضعيفة» و«وجهة النظر (ج) القوية». أولًا، تعبر وجهة النظر (ج) الضعيفة عن الرأي الذي يقتضي منا نوعًا ما — في الفيزياء المعروفة — دراسته بعناية، وسوف نجد أنواعًا معينة من أنشطة المخ خارج نطاق العمليات الحسابية. وعندما أقول «خارج نطاق العمليات الحسابية»، فإنه يتعين عليّ أن أكون أكثر وضوحًا إلى حد ما، كما سأصبح بعد لحظة. وطبقًا لهذا الرأي، فإنه لا يوجد ما نحتاج إلى البحث عنه خارج نطاق الفيزياء المعروفة من أجل إيجاد النشاط غير الحسابي المناسب. أما وجهة النظر (ج) القوية، في المقابل، فإنها تتطلب وجود شيء خارج نطاق الفيزياء المعروفة؛ حيث إن فهمنا الفيزيائي ليس ملائمًا لوصف الوعي. من الواضح أن وجهة النظر هذه يعوزها شيء، وكما استطعنا استنتاجه من الفصل الثاني، فإنني أعتقد حقًّا أن صورتنا الفيزيائية ناقصة، كما هو واضح في الشكل (٢-١٧). ومن وجهة النظر هذه، ربما يتمكن العلم في المستقبل من تفسير طبيعة الوعي، لكنّ العلم في الوقت الراهن لا يقدم تفسيرًا لها.

في الشكل (٢-١٧)، استخدمت بعض المصطلحات التي لم أعلق عليها في حينها، وخاصةً، مصطلح «القابلية للقياس» أو «القابلية للحساب». وفي الصورة القياسية، توجد بصفةٍ أساسية فيزياء قابلة للقياس في المستوى الكمي، كما أن المستوى الكلاسيكي يُعد أيضًا — على سبيل الاحتمال — قابلًا للقياس، على الرغم من وجود مشكلات تقنية متعلقة بكيفية الانتقال من المنظومات غير المترابطة القابلة للقياس إلى المنظومات المترابطة. إنها نقطة ذات أهمية بالغة، لكن لا حاجة الآن لإثارتها للمناقشة. في الحقيقة، يبدو لي أن مناصري وجهة النظر (ج) الضعيفة سوف ينبغي لهم التوصل إلى شيء ما أساسي ضمن حالات عدم اليقين هذه؛ شيء لا يمكن تفسيره في إطار الوصف القابل للقياس.

للانتقال من المستوى الكمي إلى المستوى الكلاسيكي في الصورة التقليدية، فإنه يجب تنفيذ إجراء أسميته R — أو اختزال متجه الحالة — وهو يعبر في الواقع عن فعل احتمالي بصورة كاملة، ومن ثَم تكون النتيجة مزيجًا من القابلية للقياس والعشوائية. وفيما يلي، سوف أناقش أن هذا المزيج لا يُعد جيدًا بدرجة كافية؛ فنحن نحتاج إلى شيء مختلف، وهذه النظرية الجديدة — التي تقيم جسرًا بين هذين المستويين — من الضروري ألا تكون نظرية قابلة للقياس، وسوف أتحدث أكثر قليلًا فيما يلي عما أقصده بذلك التعبير.

في الواقع، تلك هي رؤيتي لوجهة النظر (ج) القوية: إننا نتطلع إلى عدم القابلية للقياس في الفيزياء التي تقيم جسرًا بين المستويين الكمي والكلاسيكي. إنه حقًّا طلب مبالغ فيه، فما أقوله هو أننا لا نحتاج فقط لفيزياء جديدة، لكننا في حاجةٍ أيضًا لفيزياء جديدة تكون على صلة بأنشطة المخ.

بادئ ذي بدء، دعونا نتناول الموضوع الذي يتحدث عما إذا كان من المقبول وجود شيء خارج نطاق العمليات الحسابية في فهمنا أم لا. دعوني أطرح عليكم مثالًا شيقًا للغاية متعلقًا بمشكلة بسيطة في لعبة الشطرنج، في هذه الأيام تلعب أجهزة الكمبيوتر الشطرنج بمهارة بالغة. ومع ذلك عندما عُرضت لعبة الشطرنج الموضحة في الشكل (٣-٥) على أقوى جهاز



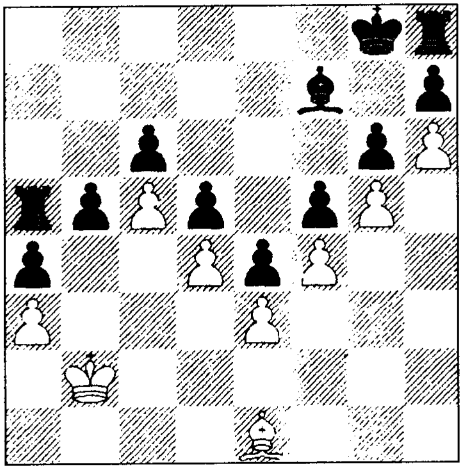
شكل ٣-٥: في هذه اللعبة، يمكن اللعب برقع الشطرنج البيضاء والتعادل بها — وهو أمرٌ سهل على الإنسان — لكن ديب ثووت اختار الرخ! (صمم اللعبة ويليام هارتستون William Hartston، وهي مأخوذة من مقال لجين سيمور Jane Seymore ودافيد نوروود David Norwood من مجلة «نيو ساينتست»، العدد ١٨٨٩، صفحة ٢٣، لعام ١٩٩٣).

كمبيوتر متاح في ذلك الحين — وهو جهاز الكمبيوتر ديب ثووت Deep Thought — فإنه فعل أمرًا شديد الغباء. في هذا الموقف، كانت رقع الشطرنج البيضاء أكثر بكثير من نظيراتها السوداء، وكانت هناك رقعتان إضافيتان من الرخ الأسود وفيل أسود. وهذا بالطبع كان ليشير بالضرورة إلى امتلاك ميزة كبيرة، لولا حقيقة وجود حاجز من البيادق يعوق كل الرقع السوداء. وبالتالي، فإن كل ما على الرقع البيضاء فعله يتمثل في التحرك خلف حاجز البيادق البيضاء، ومن ثم لا تكون هناك أية فرصة للخسارة. ومع ذلك عندما وُضع ديب ثووت في هذا الموقف، فإنه تقدم في الحال لأخذ الرخ الأسود وفتح حاجز البيادق وبالتالي، نجم عن ذلك هزيمة مشينة. والسبب فيما فعله أنه مبرمج على حساب الحركة تلو الأخرى لحين الوصول

إلى درجة معينة، وبعدها يبدأ في حساب الرقع، أو شيء من هذا القبيل. في هذا المثال، لم تكن تلك الخطوات جيدة بصورة كافية. وبطبيعة الحال، إذا كان الكمبيوتر قد حسب الخطوات واحدة تلو الأخرى لعدد إضافي آخر من المرات، لكان بإمكانه تحقيق الفوز، فالنقطة الأساسية هنا تتعلق بأن الشطرنج لعبة حسابية. حريٌ بالذكر أنه في هذه الحالة نفسها، ينظر اللاعب الإنسان إلى حاجز البيادق ويفهم أنه غير قابل للاختراق. والكمبيوتر بالطبع لا يمتلك هذا الفهم، حيث إنه ببساطة يحسب التحركات واحدة تلو الأخرى. لذلك، فإن هذا المثال يُعد شرحًا للفرق بين الحساب المجرد ونوعية الفهم.

إليك الآن مثالًا آخر نوضحه في شكل (٣-٦)، يعرض فكرة أخرى تتمثل في أخذ الرخ الأسود والفيل الأبيض، لكنّ الإجراء الصحيح الذي ينبغي عمله هو التعامل مع الفيل الأبيض كأنه بيدق واستخدامه لإنشاء حاجز آخر من البيادق. وبمجرد تعليم الكمبيوتر التعرف على حاجز البيادق، قد يكون قادرًا على التخلص من العائق الأول الذي يقابله، لكنه سيفشل عند مواجهة العائق الثاني لأنه يحتاج إلى مستوى إضافي من الفهم. ومع ذلك، فقد يدور بفكرنا أنه مع الاهتمام بصورةٍ أكبر، ربما يكون ممكنًا برمجة الكمبيوتر على كل مستويات الفهم المحتملة. حسنًا، ربما نستطيع ذلك مع لعبة الشطرنج، لكنّ المشكلة أن الشطرنج لعبة حسابية وبالتالي في النهاية يمكن حساب كل الاحتمالات باستخدام كمبيوتر ذي قدرة عالية. وهذا خارج نطاق قدرة أجهزة الكمبيوتر المتاحة حاليًّا، لكن من حيث المبدأ، هذا أمر ممكن. ومع ذلك، ينتابنا إحساس بأنه يوجد شيء آخر يحدث متعلق بـ«الفهم»، بخلاف الحساب المباشر. بالتأكيد، إن الأسلوب الذي نتناول به مشكلات لعبة الشطرنج هذه يختلف كثيرًا جدًّا عما يفعله جهاز الكمبيوتر.

هل نستطيع أن نطرح للنقاش بأسلوب أكثر فاعلية حقيقة وجود شيء في فهمنا مختلف عن الحساب؟ حسنًا، بوسعنا فعل ذلك، لكنني لا أريد أن أقضي وقتًا طويلًا في مناقشة هذا الموضوع، مع أنه بالفعل حجر الأساس لمحور حديثنا. لكن في الواقع، ينبغي أن أستغرق قليلًا من الوقت في هذا



شكل ٣-٦: في هذه اللعبة، يمكن اللعب برقع الشطرنج البيضاء والتعادل بها — ومرةً أخرى، الأمر سهلٌ للغاية على الإنسان — لكنّ جهاز كمبيوتر عاديًّا متخصصًا في لعب الشطرنج سيأخذ الرخ. (من اختبار تورنج Turing test، تأليف ويليام هارتستون ودافيد نورووود.)

النقاش، حتى مع كونه تقنيًّا إلى حد ما. وفي محاولةٍ مني لتوضيح أنه لا سبيل للهروب من تقديم هذا النقاش — الذي أوشك أن أعرضه عليكم — خصصت المئتي صفحة الأولى من كتابي Shadows of the Mind لهذا الغرض.

دعوني الآن أتحدث قليلًا عن العمليات الحسابية؛ إنها العمليات التي يجريها جهاز الكمبيوتر، والجدير بالذكر أن لدى أجهزة الكمبيوتر الحقيقية قدرًا محدودًا من السعة التخزينية. لكنني الآن سأتحدث عن جهاز كمبيوتر مثالي، يُسمى آلة تورنج، وهو يختلف عن جهاز الكمبيوتر المعتاد المستخدم للأغراض العامة فقط في حقيقة أن لديه قدرًا غير محدود من مساحة التخزين ويستطيع الاستمرار في الحساب إلى الأبد دون أي أخطاء ودون أن يبلى على الإطلاق. والآن، دعوني أقدم مثالًا على إحدى العمليات الحسابية التي لا تحتاج أي منها إلى أن تشتمل فقط على إجراء الحساب، لكن تشتمل

أيضًا على تنفيذ عمليات منطقية، وإليك مثالًا على ذلك:

- اذكر عددًا لا يكون حاصل جمع ثلاثة أعداد مربعة.

أقصد بالعدد هنا العدد الطبيعي مثل 0 و1 و2 و3 و4 و5 ... والأعداد المربعة مثل 0^2 و1^2 و2^2 و3^2 و4^2 و5^2 ... إلخ. وسأبين هنا كيفية إجراء هذا، وستكون الوسيلة غبية إلى حد ما عند التنفيذ العملي، لكنها توضح ما نقصده بالحساب. أولًا، نبدأ بالصفر ونختبر ما إذا كان مجموع ثلاثة أعداد مربعة وننظر إلى كل مربعات الأعداد الأقل من أو المساوية للصفر وسنجد أن هذا العدد هو 0^2. لذلك نلاحظ أن:

$$0 = 0^2 + 0^2 + 0^2$$

ويعني ذلك أن الـ 0 يُعد مجموع ثلاثة أعداد مربعة. تتمثل الخطوة التالية في أن نكرر المحاولة نفسها مع العدد 1، فنكتب كل الطرق المحتملة لإضافة جميع الأعداد التي تكون مربعاتها أقل من أو مساوية للعدد 1. وبعدها، نرى ما إذا كان مجموع ثلاثة منها يساوي الواحد — كما هو موضح فيما يأتي:

$$1 = 0^2 + 0^2 + 1^2$$

في الواقع، نستطيع أن نستمر بهذه الوسيلة المملة على النحو الموضح في الجدول (٣-٢) حتى نصل إلى العدد 7، لنجد أنه لا توجد أية طريقة لإضافة الأعداد المربعة 0^2 و1^2 و2^2 معًا، بأية صورة كانت للتوصل إلى العدد 7 في النهاية، والجدول (٣-٢) يبين كل الاحتمالات. وبالتالي، يكون العدد 7 هو الإجابة؛ فهو أصغر عدد لا ينتج عن مجموع ثلاثة أعداد مربعة.

في المثال السابق، كنا محظوظين لأن العملية الحسابية وصلت إلى نهاية، لكن توجد حسابات معينة لا تنتهي على الإطلاق، مثل المسألة التالية:

- اذكر عددًا لا يساوي حاصل جمع أربعة أعداد مربعة.

هناك نظرية شهيرة تعود إلى القرن الثامن عشر إلى عالم الرياضيات لاجرانج Lagrange الذي أثبت أن أي عدد يمكن التعبير عنه كمجموع أربعة أعداد

جدول ٣-٢

جرب 0	مربعات الأعداد ≤ 0 هي:	0^2	$0 = 0^2 + 0^2 + 0^2$
جرب 1	مربعات الأعداد ≤ 1 هي:	0^2 و 1^2	$1 = 0^2 + 0^2 + 1^2$
جرب 2	مربعات الأعداد ≤ 2 هي:	0^2 و 1^2	$2 = 0^2 + 1^2 + 1^2$
جرب 3	مربعات الأعداد ≤ 3 هي:	0^2 و 1^2	$3 = 1^2 + 1^2 + 1^2$
جرب 4	مربعات الأعداد ≤ 4 هي:	0^2 و 1^2 و 2^2	$4 = 0^2 + 0^2 + 2^2$
جرب 5	مربعات الأعداد ≤ 5 هي:	0^2 و 1^2 و 2^2	$5 = 0^2 + 1^2 + 2^2$
جرب 6	مربعات الأعداد ≤ 6 هي:	0^2 و 1^2 و 2^2	$6 = 1^2 + 1^2 + 2^2$
جرب 7	مربعات الأعداد ≤ 7 هي:	0^2 و 1^2 و 2^2	$7 \neq 0^2 + 0^2 + 0^2$
			$7 \neq 0^2 + 0^2 + 1^2$
			$7 \neq 0^2 + 0^2 + 2^2$
			$7 \neq 0^2 + 1^2 + 1^2$
			$7 \neq 0^2 + 1^2 + 2^2$
			$7 \neq 0^2 + 2^2 + 2^2$
			$7 \neq 1^2 + 1^2 + 1^2$
			$7 \neq 1^2 + 1^2 + 2^2$
			$7 \neq 1^2 + 2^2 + 2^2$
			$7 \neq 2^2 + 2^2 + 2^2$

مربعة. لذلك، إذا استمررنا في البحث كثيرًا بأسلوب غير عقلاني لإيجاد عدد كهذا، فإن جهاز الكمبيوتر ببساطة سيظل يحاول للأبد ولن يجد إجابة على الإطلاق. ويوضح هذا حقيقة أنه توجد فعليًّا بعض العمليات الحسابية التي لا يمكن التوصل إلى حل لها على الإطلاق.

والجدير بالذكر أن نظرية لاجرانج من الصعب إثباتها للغاية، لذلك نقدم لك الآن نظرية أسهل ويحدوني الأمل في تقدير الجميع لها!

- اذكر عددًا فرديًّا يساوي حاصل جمع عددين زوجيين.

إن بإمكانك ضبط جهاز الكمبيوتر بحيث يستطيع إعطاءك الإجابة الصحيحة، وسوف تجد أنه سيستمر في البحث عن هذا العدد إلى ما لانهاية لأننا نعلم أنه عند جمع أي عددين زوجيين معًا نحصل دائمًا على عدد زوجي.

إليك الآن مثالًا أكثر خداعًا:

- اذكر عددًا زوجيًّا أكبر من ٢ بحيث لا يكون حاصل جمع عددين أوليين.

هل لهذه العملية الحسابية أية نهاية على الإطلاق؟ لا يُعتقد عمومًا أن لها نهاية، لكن هذا ليس إلا مجرد حدس يُعرف باسم حدسية جولدباخ Goldbach. وإنه لأمر بالغ الصعوبة ألا يعرف أحد على نحو مؤكد ما إذا كان هذا صحيحًا أم لا. لذلك، نورد هنا ثلاث عمليات حسابية (محتملة) غير منتهية، إحداها سهلة والأخرى صعبة، والثالثة بالغة الصعوبة حتى إنه لا يعرف أحد حتى الآن هل لها نهاية أم لا.

والآن، دعونا نطرح السؤال الآتي:

- هل يستخدم علماء الرياضيات خوارزمية حسابية (لنقل أ مثلًا) ليقنعوا أنفسهم أن هناك عمليات حسابية معينة ليست لها نهاية؟

مثلًا، هل كان لدى لاجرانج نوع ما من برامج الكمبيوتر في رأسه، أدى به في النهاية إلى التوصل لنتيجة أن أي عدد يساوي مجموع أربعة مربعات؟ بالطبع، إنك لست في حاجة إلى أن تصبح لاجرانج نفسه؛ إذ يتعين عليك ببساطة أن تكون شخصًا عاديًّا يتبع برهان لاجرانج فقط. لاحظ أنني لست معنيًّا بأصل مناقشات لاجرانج وبراهينه، لكنني مهتم فقط بمسألة الفهم، وذلك هو السبب في أنني عبرت عن السؤال بالكيفية السابقة، وفي الواقع، يعني التعبير «ليقنعوا أنفسهم» التوصل لهذا الفهم.

إن المصطلح الفني المُستخدم للتعبير عن أية صيغة ذكرناها من قبل يتمثل في «الجملة Π_1» التي تؤكد أن هناك عمليات حسابية معينة ليست لها نهاية. ولكي يصبح نقاشنا التالي ذا قيمة، نحتاج فقط للتفكير في جمل من هذه النوعية لأصل بك إلى الاقتناع بأنه لا وجود للخوارزمية أ.

لكي أتمكن من إجراء ذلك، فإنني أحتاج لقدر بسيط من التعميم، ويتعين عليّ أن أتحدث عن العمليات الحسابية التي تعتمد على عدد طبيعي

(n)، وإليك الآن بعض الأمثلة:

- اذكر عددًا طبيعيًّا لا يساوي حاصل جمع مربعات أعداد n.

رأينا من نظرية لاجرانج أنه إذا كان n يساوي 4 أو أكثر، فلا تكون له نهاية. أما في حالة n يساوي 3، فقد أصبحت له نهاية، وفيما يأتي مسألة حسابية أخرى:

- اذكر عددًا فرديًّا يساوي حاصل جمع أعداد زوجية n.

حسنًا، لا يهمنا قيمة العدد n؛ فهذا أمر لن يساعدنا على الإطلاق، حيث لا تنتهي المسألة الحسابية عند أية قيمة لــ n مهما كانت. وفيما يخص حدسية جولدباخ، نقدم المسألة الآتية:

- اذكر عددًا زوجيًّا أكبر من ٢ لا يساوي حاصل جمع أعداد أولية n.

إذا كانت حدسية جولدباخ صحيحة، فلن تتوقف هذه العملية الحسابية عند أي n مهما كان (بخلاف 0 و1)، وبطريقةٍ ما كلما زاد n كانت العملية أسهل. في الواقع، أعتقد أن لــ n قيمة كبيرة نعلم منها فعليًّا أن العملية الحسابية «بلا نهاية».

المهم في موضوعنا هذا أن هذه الأنواع من العمليات الحسابية تعتمد على العدد الطبيعي n. وهذا، في الواقع، أمرٌ محوري في المعالجة الشهيرة المعروفة باسم معالجة جودل، وسوف أناقش هذا الأمر بأسلوب معين طبقًا لألان تورنج، لكنني سوف أستخدم معالجته بأسلوب يختلف قليلًا عنه. وإذا لم تكن تجيد التعامل مع المعالجات الرياضية، فإنه ينبغي أن تتغاضى عن هذه الحقيقة بعض الشيء، إذ إن النتيجة هي الأمر المهم. لكن على أية حال، فهذه المعالجة ليست معقدة جدًّا، فهي مربكة فقط.

إن العمليات الحسابية، التي تُجرى على العدد n، تُعد بصورة أساسية برامج للكمبيوتر، ويمكننا عمل قائمة لبرامج الكمبيوتر وإلحاق كل منها بعدد، وليكن p. وهكذا نغذي جهاز الكمبيوتر متعدد الأغراض بالعدد p ونتركه يعمل لينفذ العمليات الحسابية pth على أي عدد n نختاره، ويُكتب

العدد p كلاحقة للرموز. وهكذا نضع قائمة ببرامج الكمبيوتر، أو العمليات الحسابية، التي تُجرى على العدد n، واحدًا تلو الآخر — كما يأتي:

$$C_0(n), C_1(n), C_2(n), C_3(n), \ldots, C_p(n), \ldots .$$

سوف نفترض أن هذه قائمة بكل العمليات الحسابية الممكنة $C_p(n)$ وأننا نستطيع إيجاد وسيلة فعّالة لترتيب برامج الكمبيوتر هذه، بحيث يكون العدد p دالًّا على البرنامج pth في الترتيب. إذن يكون $C_p(n)$ اختصارًا لبرنامج pth مطبق على العدد الطبيعي n.

لنفترض الآن أن لدينا إجراءً حسابيًّا أو خوارزميًّا يُسمى A، يمكن أن يؤثر على زوج من الأعداد (p وn)، وعندما يصل هذا الإجراء إلى نهايته، فإنه يزودنا بتفسير صحيح بأن العملية الحسابية $C_p(n)$ غير منتهية. ولن يكون ضروريًّا دائمًا أن يعمل الإجراء A، بمعنى أنه قد تكون هناك بعض العمليات الحسابية $C_p(n)$ غير المنتهية، في حين تكون العملية $A(p,n)$ غير منتهية أيضًا. لكنني أريد أن أؤكد أن A لا يتسبب فعليًّا في حدوث أي أخطاء، ومن ثَم إذا كانت العملية $A(p,n)$ منتهية، كانت العملية $C_p(n)$ غير منتهية بالتأكيد. فلنحاول أن نتخيل أن علماء الرياضيات من البشر يعملون طبقًا لبعض الإجراءات الحسابية A عندما يصيغون (أو يتبعون) تفسيرًا رياضيًّا صارمًا لفرض رياضي (لنقل مثلًا من نوع الجملة Π_1). ونفترض أيضًا أنهم متاح لهم جميعًا معرفة ماهية A وأنهم يعتقدون أنه إجراء سليم. كما نحاول أن نتخيل أن A يشتمل على كل الإجراءات المتاحة لعلماء الرياضيات من البشر من أجل تفسير أن العمليات الحسابية لا تنتهي بإقناع. ويبدأ الإجراء A بالنظر إلى الحرف p لاختيار برنامج الكمبيوتر، ومن ثم وضع العدد n في الاعتبار لاختيار العدد الذي سيُطبق عليه الإجراء. حينئذ، إذا كان للإجراء الحسابي A نهاية، فإن ذلك يعني أن العملية الحسابية $C_p(n)$ ليست لها نهاية. ولذلك فإنه:

إذا كان للإجراء $A(n,n)$ نهاية، كان الإجراء $C_p(n)$ بلا نهاية. (١)

وهذه هي وظيفة الإجراء A، وهي تتمثل في توفير طريقة مقنعة لنا لا جدال فيها بأن بعض العمليات الحسابية ليست لها نهاية.

الآن، افترض أننا جعلنا $p = n$؛ قد يبدو الإجراء غريبًا بعض الشيء، لكنه الإجراء الشهير المعروف باسم الإجراء القطري لكانتور Cantor، ولا يوجد أي خطأ في استخدامه. إذن نصل إلى النتيجة التي تقول إنه:

إذا كان للإجراء $A(n, n)$ نهاية، فإنه لا نهاية للإجراء $C_n(n)$.

لكن الآن، يعتمد الإجراء $A(n, n)$ على عدد واحد فقط، وبالتالي لا بد أن يكون أحد برامج الكمبيوتر $C_p(n)$، لأن هذه القائمة تشمل العمليات الحسابية المُطبقة على متغير واحد n. دعنا نفترض أن برنامج الكمبيوتر المماثل لـ $A(n, n)$ يتخذ الرمز k، إذن سيكون:

$$A(n, n) = C_k(n)$$

الآن، إذا جعلنا $n = k$، نجد أن:

$$A(k, k) = C_k(k)$$

بعد ذلك، ننظر إلى العبارة رقم (١) السابقة، ونصل إلى الاستنتاج الآتي:

إذا كان للإجراء $A(k, k)$ نهاية، فإنه ليس للإجراء $C_k(k)$ نهاية.

لكنّ $A(k, k)$ هو نفسه $C_k(k)$، لذلك، إذا كان لـ $C_k(k)$ نهاية، فإنه لا يُتوصل لنهايته وذلك يعني أنه بلا نهاية. وهذا أمر منطقي واضح، لكن هنا يكمن الارتباك — فهذه العملية الحسابية الخاصة ليست لها نهاية — وإذا كنا نصدق في صحة الإجراء A، إذن لا بد أن نصدق أن $C_k(k)$ بلا نهاية. لكن A أيضًا بلا نهاية، وبناءً عليه فإنه لا «يعرف» أن $C_k(k)$ بلا نهاية. لذلك، فإن الإجراء الحسابي مع كل هذا لا يستطيع احتواء جميع البراهين

الرياضية اللازمة لتحديد ما إذا كانت عمليات حسابية معينة بلا نهاية؛ أي من أجل وضع حجر أساس لحقيقة الجمل Π_1. ذلك هو جوهر معالجة جودل–تورنج بالأسلوب الذي أفضله.

قد يتبادر إلى أذهاننا أن نتأكد من مدى التأثير الكامل لهذه المعالجة؛ فما تقوله بوضوح يتمثل في أن الحدس الرياضي لا يمكن ترميزه في صورة بعض العمليات الحسابية التي نستطيع أن نعرف أنها صحيحة. وفي بعض الأحيان، يُطرح هذا الموضوع للمناقشة وهذا الأمر في حد ذاته يبدو لي وكأنه التأثير الواضح له. والجدير بالذكر أنه من المهم قراءة ما قاله تورنج وجودل بخصوص هذه النتيجة، وإليك الآن رأي تورنج:

> «بعبارة أخرى، إذا كان من المتوقع لآلة ألا تخطئ، فإنها لا يمكن أيضًا أن تكون ذكية. فثمة عدة نظريات تؤكد هذا الأمر غالبًا، لكنها لا تقول شيئًا عن مدى ذكاء الآلة الذي ستظهره في حالة عدم الوقوع في الخطأ.»

وهكذا، كانت فكرة تورنج تتمثل في أن المعالجات الشبيهة بمعالجة جودل–تورنج يمكن أن تتوافق مع فكرة أن علماء الرياضيات أجهزة كمبيوتر بصفةٍ أساسية في حالة عدم إثبات صحة الإجراءات الخوارزمية التي يعملون طبقًا لها من أجل تأكيد الحقائق الرياضية. وفي هذا الحالة، يكون بإمكاننا تضييق نطاق الاهتمام ليتمركز حول العبارات الحسابية، مثل جمل Π_1، التي تُشكل نوعًا مقيدًا من العبارات. وفي اعتقادي أن تورنج كان يفكر فعليًّا في أن عقل الإنسان يستخدم الخوارزميات، لكن هذه الخوارزميات كانت خاطئة، بمعنى أنها في الواقع لم تكن سليمة. وأنا شخصيًّا، أرى أن وجهة النظر هذه لا يمكن الاعتقاد في صحتها، خاصةً بسبب أننا لسنا معنيين هنا بكيفية حصول المرء على الإلهام، لكن ببساطة بكيف يمكن للمرء أن يتبع معالجة ويفهمها. ويبدو لي أن موقف تورنج من الصعب الاعتقاد في صحته إلى حد ما، وطبقًا لرأيي الخاص، فإن تورنج كان يمكن أن يحتل أعلى الدرجات العلمية.

دعونا ننظر إلى ما قاله جودل — ويجدر القول إنه طبقًا لرأيي الخاص، لم يكن جودل مُوفقًا فيما توصل إليه إلى درجة بعيدة. ومع أن تورنج وجودل كانت أمامهما الحجة نفسها، فقد توصلا إلى نتائج متعارضة بصفةٍ أساسية. ومع ذلك، فإنه مع أن جودل لم يكن يعتقد حقًّا أن الحدس الرياضي يمكن تبسيطه إلى عملية حسابية دون تقليل قيمته، فإنه لم يكن بمقدوره استبعاد هذه الاحتمالية بصورة كبيرة، وفيما يأتي نعرض ما قاله جودل:

> «على الجانب الآخر، وطبقًا لما ثبُت حتى الآن، فإنه لا يزال من المحتمل أن تكون هناك آلة (اكتشفت حتى تجريبيًّا) لإثبات الفرضيات تكون في الواقع مكافئة للحدس الرياضي، لكنها لا تستطيع إثبات أنها كذلك، كما لا يمكن إثبات أنها تقدم فرضيات صحيحة فقط خاصة بنظرية الأعداد المتناهية.»

تمثلت معالجة جودل في أنه يوجد «خطأ منطقي» في الاستخدام المباشر لمعالجة جودل–تورنج كتفنيد للنزعة الحسابية (أو النزعة الوظيفية)، بمعنى أن علماء الرياضيات قد يستخدمون إجراءً خوارزميًّا صحيحًا، لكننا لا نستطيع أن نعرف بشكل مؤكد أنه صحيح. لذلك كان جزء «المعرفة» الذي اعتقده جودل بمنزلة خطأ منطقي وجزء «الصحة» هو الذي ركز عليه تورنج.

وفي رأيي الشخصي، لا تُعبر أي من وجهتي النظر السابقتين عن أية طريقة مقبولة ظاهريًّا تجعلنا نتخلى عن هذا الجدال. فما تقوله فرضية جودل–تورنج إنه إذا وُجد أن أي إجراء خوارزمي (لتكوين الجمل Π_1) صحيح، إذن نستطيع أن نعرض في الحال شيئًا يجعله لاغيًا، ويرجع ذلك إلى أننا نستخدم إجراءً خوارزميًّا لا يمكن معرفة أنه صحيح وربما يوجد نوع معين من الوسائل التعليمية يجعلنا نستطيع تطوير هذه المهارة. وفي الواقع، نجد هذه الموضوعات، وكثيرًا غيرها، في كتابي Shadows of the Mind، لكنني هنا لا أريد أن أستمر في شرحها، وسأكتفي فقط بذكر نقطتين.

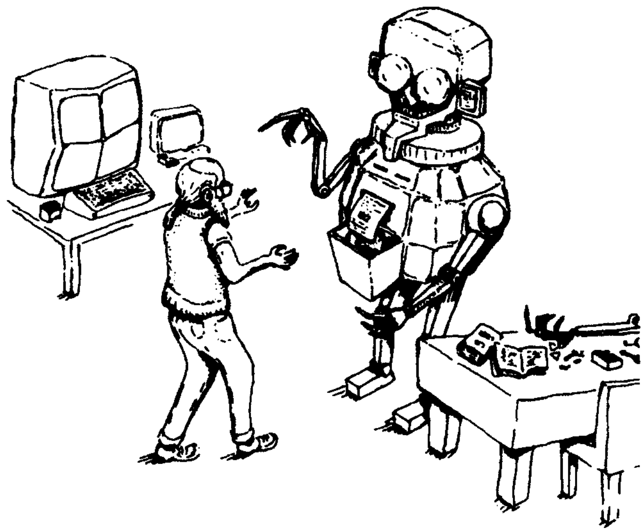


شكل ٣-٧: نادرًا ما كانت أية قدرة خاصة على تنفيذ الإجراءات الرياضية المتطورة تُعتبر لأسلافنا القدماء ميزة اختيارية، في حين أن القدرة العامة على الفهم كانت تُعد كذلك.

كيف نشأت هذه الخوارزمية المفترضة؟ في حالة بني البشر، لا بد وأن تكون قد نتجت — على ما يبدو — من الاختيار الطبيعي، أو في حالة الإنسان الآلي، من البنية المدروسة للذكاء الاصطناعي. في الواقع، لن أستفيض في التحدث عن هذا الأمر بالتفصيل، لكنني سأوضحه ببساطة من خلال صورتين مبسطتين استعرتهما من كتاب سابق لي.

تتعامل الصورة الأولى مع الاختيار الطبيعي (شكل ٣-٧)، وفي هذا الشكل نستطيع أن نرى العالم الرياضي وهو في وضع غير ملائم طبقًا لوجهة نظر الاختيار الطبيعي، لأننا نرى نمرًا مسيف الأسنان (وهو حيوان منقرض) يتأهب للانقضاض عليه. في المقابل، فإن أبناء أعمامه في الجانب الآخر من الصورة يصطادون فيل الماموث ويشيدون المساكن ويزرعون المحاصيل وخلافه. في الواقع، تشتمل هذه الأشياء على الفهم، لكنها ليست متعلقة بالرياضيات. ولذلك، ربما كانت نوعية الفهم شيئًا اختير لنا، لكنّ الخوارزميات الخاصة بالتعامل مع الرياضيات لم تكن كذلك.

تتعامل الصورة الأخرى مع البنية المدروسة للذكاء الاصطناعي، وفي كتابي Shadows of the Mind عرضٌ لقصة قصيرة عن أحد خبراء الذكاء الاصطناعي في المستقبل يتناقش مع الإنسان الآلي (شكل ٣-٨). والمعالجة



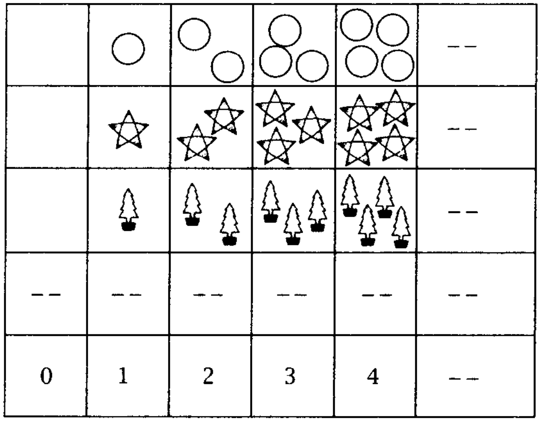
شكل ٣-٨: ألبرت إمبريتور Albert Imperator وهو يواجه نظام السيبر cybersystem المثبتة مصداقيته رياضيًّا. في كتاب Shadows of the Mind، خُصصت المئتا صفحة الأولى لحسم الانتقادات الموجهة لاستخدام معالجة جودل-تورنج، وجوهر هذه المعالجات الجديدة يتضمنها الحوار بين أحد خبراء الذكاء الاصطناعي والإنسان الآلي الخاص به.

الكاملة المعروضة في الكتاب طويلة ومعقدة نوعًا ما، ولا أشعر حقيقةً بضرورة سردها إجمالًا هنا. والجدير بالذكر أن استخدامي الأصلي لمعالجة جودل-تورنج قد تعرض للنقد من كل الزوايا، لذا يتعين تناول كل هذه النقاط المتباينة، وقد حاولت حصر معظم هذه المعالجات الجديدة المُقدمة في كتاب Shadows of the Mind في النقاش الذي دار بين رجل الذكاء الاصطناعي والإنسان الآلي الخاص به.

دعونا نعد مرةً أخرى إلى التساؤل عما يحدث. في الواقع، تتعلق معالجة جودل بأشياء معينة عن الأعداد، وما ينبئنا به جودل أنه لا يوجد

نظام للقواعد الحسابية يستطيع تمييز خصائص الأعداد الطبيعية. ومع عدم وجود طريقة حسابية لتمييز الأعداد الطبيعية، فإن أي طفل يعرف هذه الأعداد. وكل ما يتعين علينا عمله هو أن نوضح للأطفال الأعداد المختلفة للأشياء، كما هو مبين في الشكل (٣-٩)، وبعد فترة يستطيعون أن يستخلصوا مفهوم الأعداد الطبيعة من الأمثلة المحددة المقدمة لهم. بالطبع، إننا لا نقدم للأطفال مجموعة من القواعد الحسابية؛ فما نفعله هو تمكين الأطفال من «فهم» ماهية الأعداد الطبيعية. ولعلي أقول إن الطفل قادر على إقامة نوع معين من «الربط» مع العالم الأفلاطوني للرياضيات. وفي واقع الأمر، لا يحبذ بعض الناس هذا الأسلوب في الحديث عن الحدس الرياضي، لكن يبدو لي أنه يتعين علينا أن نستوعب الأمور بهذه الطريقة للتعامل مع ما يحدث. وإلى حدٍّ ما، توجد الأعداد الطبيعية بالفعل «هناك» في موضع ما في العالم الأفلاطوني الذي نستطيع الاتصال به من خلال مقدرتنا على الوعي بالأشياء. وإذا كنا ببساطة أجهزة كمبيوتر بلا عقل، لم تكن لتصبح لدينا تلك المقدرة. والقواعد ليست هي الأدوات التي تمكّنا من فهم طبيعة الأعداد الطبيعية — كما توضح نظرية جودل — حيث إن فهم «ماهية» الأعداد الطبيعية مثال جيد على الاتصال الأفلاطوني.

لذلك، فإن ما أقوله، بعمومية أشمل، هو أن الفهم الرياضي لا يُعد شيئًا حسابيًّا، لكنه شيء مختلف تمامًا، يعتمد على مقدرتنا على الوعي بالأشياء. قد يقول البعض: «حسنًا، إن كل ما تزعم أنك أثبته يتمثل في أن الحدس الرياضي ليس حسابيًّا، لكنه لا يقدم الكثير عن الأشكال الأخرى للوعي.» مع ذلك، يبدو لي أن هذا كافٍ جدًّا، فمن غير المعقول الفصل بين الفهم الرياضي والأنواع الأخرى للفهم. وذلك هو ما كنت أحاول توضيحه من خلال الصورة الأولى (الموضحة في الشكل ٣-٧). إن الفهم شيء ليس مقصورًا على الرياضيات، وقد طور الإنسان هذه السمة للفهم العام، وهذه السمة أيضًا ليست حسابية لأن الفهم الرياضي لا يُعد كذلك أيضًا. بالإضافة إلى ما سبق، لم أضع حدًّا فاصلًا بين الفهم الإنساني والوعي الإنساني بصفةٍ عامة. لذلك، مع أنني قلت إنني لا أعرف ماهية الوعي الإنساني،



شكل ٣-٩: يستطيع أي طفل استخلاص الفكرة الأفلاطونية للعدد الطبيعي من خلال عدد محدود فقط من الأمثلة البسيطة.

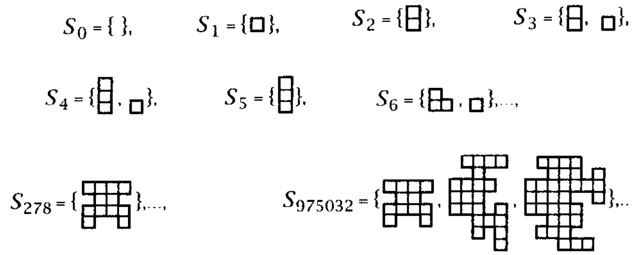
فيبدو لي أن الفهم الإنساني يُعد مثالًا عليه، أو على الأقل شيئًا يحتاج إليه. ولن أفصل أيضًا بين الوعي الإنساني والوعي الحيواني، وهذا هو ما قد يكون سببًا في التناقض مع بعض الناس. وذلك، حيث يبدو لي أن الإنسان يشبه العديد من الأنواع الأخرى من الحيوانات، ومع أننا نملك فهمًا أفضل للأشياء مقارنةً بالحيوانات، فإن لدى كل منها نوعًا من الفهم، ومن ثم نوعًا من الوعي.

وبناءً عليه، تقترح عدم القابلية للقياس في بعض جوانب الوعي — وبصفةٍ خاصة في الفهم الرياضي — أنها لا بد أن تكون سمة للوعي في مجمله. وأنا شخصيًّا أقترح هذا أيضًا.

الآن، ما الذي أعنيه بعدم القابلية للقياس؟ لقد تحدثت كثيرًا عنها لكن ينبغي أن أقدم مثالًا على شيء غير حسابي لأشرح ما أقصده. إن ما أوشك على تقديمه هو مثال على ما يُسمى غالبًا «كون على نمط دمية»؛ إنه الشيء الذي يفعله الفيزيائيون عندما لا يستطيعون التفكير في شيء أفضل يفعلونه. إن ما يهم بخصوص نموذج الدمية أنه لا يُفهم ظاهريًّا على أنه نموذج حقيقي للكون، حيث إنه ربما يعكس فقط سمات معينة من الكون،

لكنّ ذلك لا يعني أن يُعامل بجدية على أنه نموذج للكون الفعلي. المقصود من ذلك أنه قُدم فقط من أجل توضيح نقطة معينة.

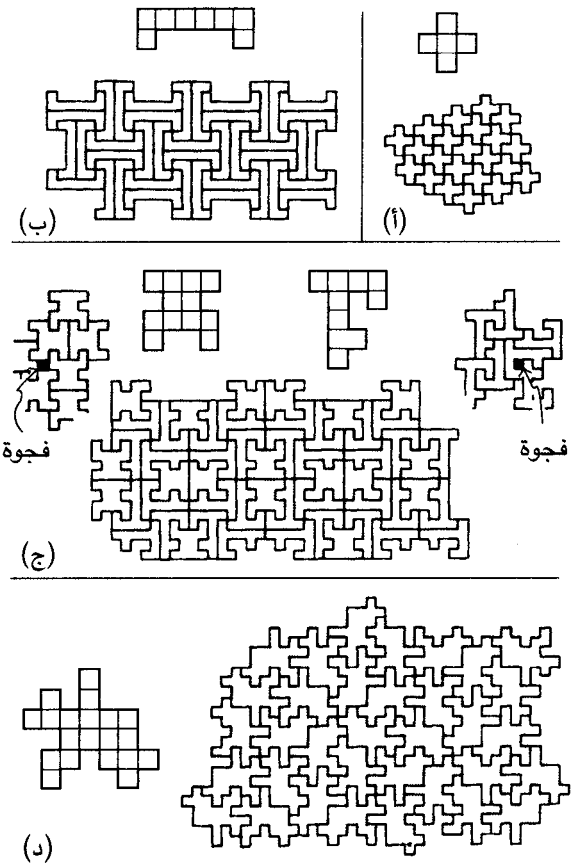
في هذا النموذج، ثمة زمن متقطع يمر على النحو $0, 1, 2, 3, 4, \ldots$ وتتألف حالة الكون عند أي زمن محدد من مجموعة من الأسطح المستوية المكونة من التحاق عدد من المربعات المتماثلة بعضها ببعض عند الحواف؛ وهذه الأسطح تُعرف باسم مجموعة بولي أومينو polyomino. ما المقصود بمجموعة بولي أومينو؟ حسنًا، يوضح الشكل (٣-١١) بعض الأمثلة عليها، والجدير بالذكر أن المربعات في البولي أمينو تُرص جميعها معًا على طول الحواف المختلفة لتؤلف سطحًا مستويًا. في نموذج الدمية هذا، تؤلف حالة الكون عند أية لحظة مجموعتان منفصلتان محدودتان من البولي أومينو، وفي الشكل (٣-١٠) أوردت قائمة كاملة بجميع المجموعات المحدودة الممكنة للبولي أومينو على النحو $S_0, S_1, S_2, \ldots$ بأسلوب حسابي. والسؤال الآن هو: فيمَ يتمثل تطور أو ديناميكيات هذا الكون التخيلي؟ أولًا، نبدأ في الزمن صفر بمجموعتي البولي أومينو (S_0, S_0)، ثم نستمر بعدها مع أزواج مجموعات البولي أومينو الأخرى طبقًا لقاعدة دقيقة معينة. تعتمد هذه القاعدة على ما إذا كان من المحتمل أم لا استخدام مجموعة بولي أومينو محددة لتغطية المستوى بكامله ببساطة بقطع البولي أومينو. ويصبح السؤال هو: هل تستطيع تغطية المستوى كله بدون فجوات أو تداخلات للقطع بعضها مع بعض باستخدام قطع البولي أومينو للمجموعة المحددة فقط؟ الآن، افترض أن حالة الكون في نموذج الدمية عند لحظة معينة من الزمن تتمثل في زوج مجموعتي البولي أومينو (S_q, S_r). وقاعدة تطور هذا النموذج تتمثل في أننا إذا استطعنا تغطية المستوى بقطع البولي أومينو لمجموعة S_q، فإننا نتجه بعدها إلى المجموعة التالية S_{q+1}، بحيث يكون الزوج (S_{q+1}, S_r) ممثلًا لحالة الكون في اللحظة التالية للزمن. وإذا لم نتمكن من فعل ذلك، يتعين أن نستبدل الزوج ليصبح (S_r, S_{q+1}). يُعد الكون على نمط دمية كونًا غاية في البساطة والصغر، ولكن ما فكرته الأساسية؟ في الحقيقة، تتمثل فكرته الأساسية في أنه مع أن تطوره حتمي بصورة كاملة — لقد قدمت لك آنفًا



شكل ٣-١٠: كون غير قابل للقياس على نمط دمية؛ تتكون الحالات المختلفة للكون الدمية الحتمي غير القابل للقياس عن طريق أزواج من مجموعات البولي أومينو المنتهية. وفي أثناء الوقت الذي تغطي فيه المجموعة الأولى من هذا الزوج السطح المستوي، يستمر التطور الزمني بالنسبة للمجموعة الأولى في التزايد بالترتيب الرقمي، وبالنسبة للمجموعة الثانية في «تحديد الوقت». وعندما لا تغطي الفئة الأولى السطح المستوي، يحدث تبادل للمجموعتين مع استمرار التطور. ويستمر الأمر على النحو الآتي: $(S_0, S_0), (S_0, S_1), (S_1, S_1), (S_2, S_1), (S_3, S_1),$ $(S_4, S_1), \ldots, (S_{278}, S_{251}), (S_{251}, S_{279}), (S_{252}, S_{579}), \ldots.$

قاعدة حتمية غاية في الوضوح بصورة مطلقة فيما يتعلق بكيفية تطور العالم — فإنه غير قابل للقياس. ومما ترتب على إحدى نظريات روبرت برجر Robert Berger أنه لا يوجد أي إجراء حسابي يستطيع محاكاة تطور هذا العالم لأنه لا يوجد إجراء لأي قرار حسابي لتحديد متى ستبدأ مجموعة بولي أومينو في تغطية السطح.

يفسر هذا النقطة الأساسية المتمثلة في أن القابلية للقياس والحتمية شيئان مختلفان. والشكل (٣-١١) يوضح بعض الأمثلة لتغطيات الأسطح المستوية باستخدام مجموعات البولي أومينو، في المثالين (أ) و(ب)، يستطيع هذان الشكلان تغطية سطحًا مستويًا كاملًا كما هو موضح. وفي المثال (ج)، لا يستطيع الشكلان الأيسر والأيمن تغطية سطحًا مستويًا بمفردهما — لأنه في كل حالة منهما توجد فجوات — لكن إذا جُمعا معًا يستطيعان تغطية



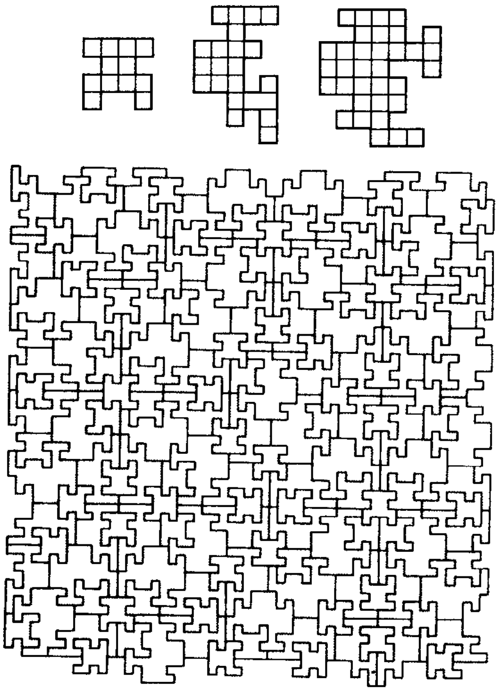
شكل ٣-١١: مجموعات مختلفة من البولي أومينو تغطي السطح الإقليدي اللانهائي. (من المسموح إجراء هذه العملية عكسيًّا.) لا تستطيع أي من قطع البولي أومينو في القسم (ج) تغطية السطح بمفردها.

السطح بأكمله، كما هو موضح في القسم (ج). بالإضافة إلى ذلك، يغطي المثال (د) السطح — ولكن بالطريقة الموضحة فقط — وهذا يفسر إلى أي مدى يمكن أن تصبح هذه العملية معقدة.

مع ذلك فقد تصبح الأمور أسوأ، ودعوني الآن أوضح لكم المثال المعروض في الشكل (٣-١٢)، في الواقع، تعتمد نظرية روبرت برجر على وجود مجموعات تغطية مماثلة. والمجموعات الثلاث الموضحة أعلى الشكل ستغطي السطح بأكمله، لكن لا توجد وسيلة لإجراء هذا على نحو يستطيع فيه الشكل أن يكرر نفسه. فالأمر مختلف على الدوام عندما نستمر في الاتجاه للخارج، كما أنه ليس من السهل القيام بذلك فعليًّا. مع ذلك، يمكن إجراء هذه العملية، كما أن وجود تغطيات مثل هذه يرجع إلى المعالجة التي قدمها روبرت برجر التي يستتبعها بالتالي أنه لا يوجد برنامج كمبيوتر يستطيع محاكاة هذا الكون الدمية.

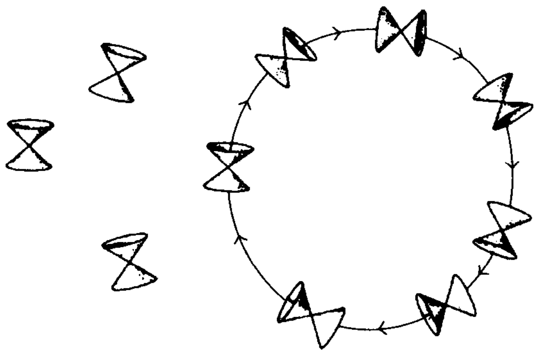
ماذا عن الكون الفعلي؟ حسنًا، لقد عرضت للنقاش في الفصل الثاني أنه يوجد شيء أساسي مفقود في الفيزياء التي نستخدمها. هل يوجد أي سبب نستطيع استنتاجه من الفيزياء ذاتها يدعو للتفكير في أنه ربما يوجد شيء غير قابل للقياس في هذه الفيزياء المفقودة؟ حسنًا، أعتقد أنه يوجد سبب لتصديق هذا؛ ذلك أن نظرية الجاذبية الكمية الحقيقية قد تكون غير قابلة للقياس. وهذه الفكرة في الواقع لم تأت من فراغ، وسوف أشير إلى أن عدم القابلية للقياس هي خاصية لأسلوبين مستقلين تمامًا أحدهما عن الآخر للتعامل مع الجاذبية الكمية. والشيء المميز لهذين الأسلوبين يتمثل في أنهما يشتملان على تراكب كمي لحالات زمكان رباعية الأبعاد، والعديد من المناهج الأخرى تشتمل على تراكبات لحالات زمكان ثلاثية الأبعاد فقط.

أول هذين الأسلوبين هو نظام جيروتش-هارتل Geroch-Hartle للجاذبية الكمية، الذي ثُبت أنه يشتمل على عنصر غير قابل للقياس، لأنه يسفر عن نتيجة، طبقًا لماركوف Markov، تؤكد أن متعددات الفروع الأربعة الطوبولوجية ليست قابلة للتصنيف قياسيًا. في الواقع، لن أستمر في شرح هذه المسألة التقنية، في حين أنها توضح أن هذه الخاصية لعدم القابلية للقياس قد نجمت بصورة طبيعية أثناء محاولات الدمج بين النسبية العامة وميكانيكا الكم.



شكل ٣-١٢: تغطي هذه المجموعة لقطع البولي أومينو الثلاثة السطح المستوي بصورة غير دورية فقط.

أمّا الأسلوب الثاني الذي يتعامل مع الجاذبية الكمية الذي تُعد عدم القابلية للقياس إحدى خصائصه، فيظهر في بحث لدافيد داتيش David Deutsch. وظهرت عدم القابلية للقياس في نسخة تمهيدية لبحث أجراه، وعندما أصدر البحث بصورته النهائية اختفت معالجته لعدم القابلية للقياس من البحث. وقد سألته عن هذا وأكد لي أنه حذفها، ليس بسبب أنها كانت خاطئة، لكن لأنها كانت عديمة الصلة بباقي البحث. وتتمثل وجهة نظره في أنه في حالات تراكب الزمكان، يتعين أن نضع في الاعتبار على الأقل احتمالية أن بعض هذه الأكوان الممكنة قد يكون لها خطوط مغلقة شبه زمنية (شكل ٣-١٣). وفيها يحدث خلل في السببية، ويختلط المستقبل مع الماضي وتتخذ



شكل ٣-١٣: عن طريق إمالة مخروط ضوئي إمالة قوية في زمكان معين، يمكن أن تحدث خطوط مغلقة شبه زمنية.

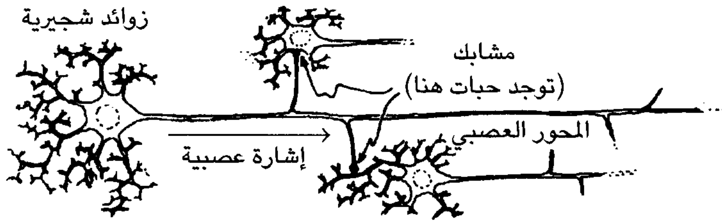
التأثيرات السببية شكل دوائر حلقية. والآن، مع أن هذه الظواهر تحتاج إلى أداء دور مضاد للحقائق فقط، كما في مسألة اختبار القنابل في الفصل الثاني، فإنها لا تزال تملك تأثيرًا على ما يحدث فعليًّا. وفي حقيقة الأمر، ليس بوسعي أن أقول إن هذا الجدال يتسم بالوضوح، لكنه على الأقل يشير إلى أن هناك شيئًا ذا طبيعة غير قابلة للقياس في النظرية الصحيحة، إذا ما اكتشفناها.

علاوةً على ما سبق، أريد أن أثير موضوعًا آخر. فقد سبق لي التأكيد أن الحتمية والقابلية للقياس شيئان مختلفان، ومحور حديثنا هذا يعتمد قليلًا في الواقع على موضوع الإرادة الحرة. في المناقشات الفلسفية، يدور الحديث دائمًا عن الإرادة الحرة في إطار الحتمية، بعبارة أخرى «هل يتحدد مستقبلنا من خلال ماضينا؟»، وعن أشياء أخرى من هذا القبيل. يبدو لي أنه توجد أعداد كبيرة من الأسئلة يمكن طرحها، مثل: «هل يتحدد المستقبل بصورة حسابية عن طريق الماضي؟» وذلك سؤال مختلف.

تثير هذه النوعية من الأسئلة كل أنواع القضايا الأخرى، لكنني سوف أطرحها فقط دون محاولة الرد عليها. وذلك، حيث توجد دائمًا جدالات مهمة حول إلى أي مدى تتحدد أفعالنا من خلال عوامل الوراثة والبيئة التي

نعيش فيها. أما الشيء الذي لا يُذكر غالبًا ودومًا يُتجاهل، فيتمثل في الحظ؛ ففي بعض الأحيان تكون كل هذه الأشياء خارج نطاق سيطرتنا. وقد يتبادر لنا هذا السؤال: «هل يوجد شيء ما آخر، ربما شيء يُسمى الذات، مختلف عن كل هذا ويقع خارج نطاق هذه المؤثرات؟» حتى القضايا القانونية ذات صلة بهذه الفكرة، على سبيل المثال تعتمد قضايا الحقوق أو المسئوليات على أفعال «ذات» مستقلة. قد يكون من الصعب فهم هذا الموضوع، حيث إن لدينا أولًا القضية المباشرة — نسبيًّا — للحتمية واللاحتمية. فالنوع المعتاد للاحتمية يشتمل على عناصر عشوائية، لكنه لا يستطيع أن يساعدنا كثيرًا. وبالطبع، لا يزال الحظ خارج نطاق سيطرتنا، وبدلًا منه ينبغي أن تكون لدينا عدم القابلية للقياس، وقد نستطيع الحصول على أنواع أفضل من عدم القابلية للقياس. في واقع الأمر، من اللافت للنظر أنه يمكن تطبيق المعالجات الشبيهة بمعالجات جودل التي قدمتها من قبل على مستويات مختلفة. مثلًا، يمكن تطبيقها على المستوى الذي أطلق عليه تورنج «آلات أوراكل» oracle machines، إن هذا الجدال يُعد أكثر عمومية من الأسلوب الذي قدمته من قبل. لذا، فإنه يجب علينا أن نتباحث فيما إذا كان يوجد نوع أفضل من عدم القابلية للقياس متضمن في الأسلوب الذي يتطور به الكون الفعلي أم لا. وفي هذا الصدد، ربما سيكون لشعورنا بالإرادة الحرة علاقة بهذا الأمر.

لقد تحدثت آنفًا عن الاتصال مع نوع معين من العالم الأفلاطوني، لكن ما طبيعة هذا «الاتصال الأفلاطوني»؟ هناك أنواع من الكلمات يبدو أنها تشتمل على عناصر غير قابلة للقياس — مثل، الأحكام والإدراك السليم والبصيرة والوعي بالجمال والمشاعر والأخلاق ... إلخ — وهذه تبدو لي أشياء لا يمكن اعتبارها سماتٍ فقط للعمليات الحسابية. حتى الآن، تحدثت عن العالم الأفلاطوني بصفةٍ أساسية في إطار الرياضيات، لكن هناك أشياء أخرى يمكن تضمينها. فمن المؤكد أن أفلاطون كان يطرح للجدال أن المفاهيم (الأفلاطونية) المطلقة لا تقتصر فقط على الحق، بل أيضًا تشمل الخير والجمال. وإذا كانت توجد فعليًّا صلة من نوع ما مع المطلقات

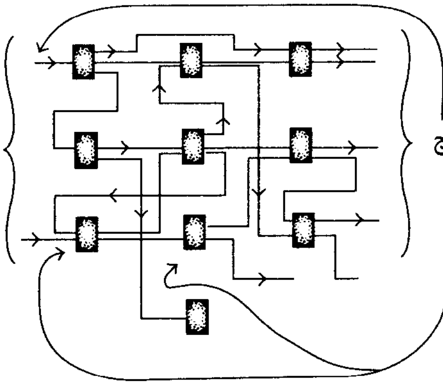


شكل ٣-١٤: مخطط تقريبي لخلية عصبية متصلة بخلايا أخرى عبر المشابك.

الأفلاطونية التي يُمكننا إدراكنا من تحقيقها، التي لا يمكن تفسيرها في إطار السلوك الحسابي، فإن ذلك بالتالي يبدو لي قضية مهمة.

حسنًا، وماذا عن مخ الإنسان؟ يوضح الشكل (٣-١٤) حقائق قليلة عن المخ، ويُذكر أن أحد المكونات الأساسية للمخ هو منظومة الخلايا العصبية. وتتكون كل خلية عصبية من جزء ليفي بالغ الطول معروف باسم المحور العصبي axon. تتشعب المحاور العصبية إلى جدائل منفصلة عند مواضع مختلفة، وكل واحدة منها تنتهي إلى ما يسمى المشبك أو التشابك العصبي synapse. وتعبر المشابك عن الموصلات التي تنتقل خلالها الإشارات من كل خلية عصبية إلى الخلايا العصبية الأخرى (في الغالب) عن طريق مواد كيميائية تسمى الناقلات العصبية. وتُعد بعض المشابك ذات طبيعة تنشيطية مع الناقلات العصبية حيث تميل إلى تعزيز تنشيط الخلية العصبية التالية، في حين يكون بعضها الآخر كابحًا يميل إلى إعاقة تنشيط الخلية التالية. ويمكن أن نشير إلى مدى الاعتماد على أحد المشابك في نقل رسالة من خلية عصبية إلى التالية بمصطلح «قدرة» المشبك. وإذا كان لكل المشابك قدرات ثابتة، لكان المخ يشبه إلى حد بعيد جهاز كمبيوتر. ومع ذلك فإن قدرات المشابك بالتأكيد يمكن أن تتغير وهناك نظريات متعددة عن كيفية تغيرها. مثلًا، كانت آلية هب Hebb mechanism واحدة من الاقتراحات الأولى لهذه العملية. مع ذلك، فإن ما يهم هو أن كل الآليات المقترحة لإحداث عمليات تغيير ذات طبيعة حسابية، وإن كان ذلك بالنسبة للعناصر الاحتمالية

شبكة عصبية اصطناعية



قواعد حسابية لتغيرات قدرة المشابك

شكل ٣-١٥

الإضافية. لذلك إذا كان لدينا قاعدة حسابية احتمالية من نوع ما تنبئنا بكيفية تغيير هذه القدرات، إذن فلا يزال بإمكاننا محاكاة عمل منظومة الخلايا العصبية والمشابك باستخدام الكمبيوتر (نظرًا لأنه يسهل أيضًا محاكاة العناصر الاحتمالية حسابيًّا) لنحصل على نموذج للنظام الموضح في الشكل (٣-١٥).

يمكن أن تؤدي الوحدات الموضحة في الشكل (٣-١٥)، التي يمكن أن نتخيل أنها ترانزستورات، دور الخلايا العصبية في المخ، مثلًا، نستطيع أن نأخذ في الاعتبار أجهزة كهربية معينة تُعرف باسم الشبكات العصبية الاصطناعية. في هذه الشبكات، ضُمنت قواعد عديدة تتعلق بكيفية تغير قدرات المشابك، عادةً من أجل تحسين نوعية بعض النتائج، لكن القوانين دائمًا ذات طبيعة حسابية. ومن اليسير رؤية أن هذا هو الوضع الطبيعي، بسبب أن الناس يحاكون هذه الأشياء على أجهزة الكمبيوتر، وهذا هو الاختبار، فإذا كان بمقدورنا وضع النموذج على الكمبيوتر، إذن يصبح حسابيًّا. على سبيل المثال، طرح جيرالد إدلمان Gerald Edelman بعض الاقتراحات عن كيفية عمل المخ وزعم أن اقتراحاته غير حسابية. ولكن، ماذا

فعل؟ لقد كان لديه جهاز كمبيوتر يحاكي كل هذه الاقتراحات، لذلك إذا كان هناك جهاز كمبيوتر من المفترض أنه قادر على محاكاتها، إذن تكون حسابية.

والآن، أريد أن أطرح السؤالين الآتيين: ما طبيعة عمل الخلايا العصبية الفردية؟ هل تعمل كأنها مجرد وحدات حسابية؟ تعبر الخلايا العصبية عن خلايا، والخلايا أشياء معقدة جدًّا ومليئة بالتفاصيل. في الواقع إنها على درجة بالغة من التعقيد حتى إذا كان لدينا واحدة فقط منها، سنجد أننا نتعامل مع أشياء معقدة جدًّا. على سبيل المثال، يستطيع البراميسيوم — وهو حيوان وحيد الخلية — أن يسبح في اتجاه الغذاء، وينسحب تجنبًا للخطر، ويتغلب على العوائق، ومن الواضح أنه يتعلم من التجربة (شكل ٣-١٦). وهذه هي الخصائص التي ربما نعتقد أنها لازمة لأي جهاز عصبي، لكن البراميسيوم ليس له جهاز عصبي بالتأكيد. وأقصى ما يمكن أن يصل إليه تفكيرنا أن يكون البراميسيوم خلية عصبية في حد ذاته! ولا توجد على وجه اليقين أية خلايا عصبية في البراميسيوم لأنه يتكون من خلية وحيدة، والأمر نفسه ينطبق على الأميبا؛ لذا يصح أن نسأل هذا السؤال: «كيف تتمكن هذه الحيوانات من فعل ذلك؟»

من الاقتراحات المطروحة أن هيكل الخلية — أي التركيب الذي يعطي، من بين أشياء أخرى، للخلية شكلها — هو الذي يتحكم في الأفعال المعقدة لهذه الحيوانات وحيدة الخلية. وفي حالة البراميسيوم، فإن الشعر القليل أو الأهداب التي تستخدمها في السباحة هي نهايات هيكل الخلية، وهي مصنوعة في أغلبها من تركيبات أنبوبية الشكل تسمى الأنيبيبات أو الميكروتيوبيولس microtubules. ويتشكل الهيكل الخلوي من هذه الأنيبيبات، إضافةً إلى الأكتين actin وكذلك خيوط filaments تقع في وسطها. كما تتحرك الأميبا أيضًا باستخدام هذه الأنيبيبات لتدفع بها أرجلها الكاذبة pseudopods.

الجدير بالذكر أن هذه الأنيبيبات تُعتبر ذات قدرات استثنائية، حيث إن الأهداب، التي يستخدمها البراميسيوم للسباحة، هي بصفة أساسية حزم من الأنيبيبات. بالإضافة إلى ذلك، تشارك الأنيبيبات بفاعلية كبيرة في عملية

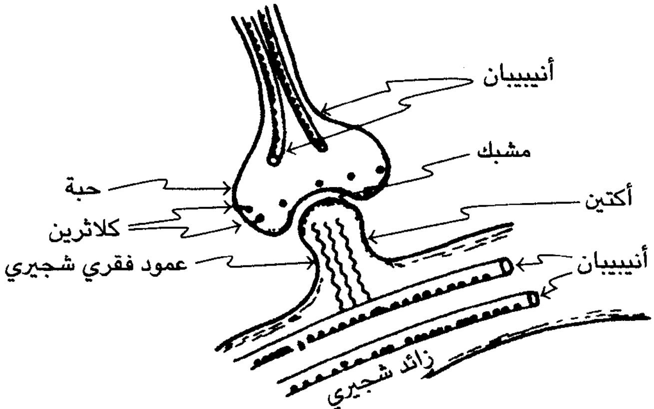


شكل ٣-١٦: حيوان البراميسيوم: لاحظ الأهداب الشبه شعرية التي تُستخدم في السباحة، وهذه الأهداب تشكل الأطراف الخارجية لهيكل خلية البراميسيوم.

الانقسام الخيطي mitosis، أي انقسام الخلية. ويحدث هذا حقيقةً للأنيبيبات في الخلايا العادية، لكن من الواضح أنه لا يحدث في الخلايا العصبية؛ حيث إنها لا تنقسم وربما يكون هذا اختلافًا مهمًّا بين نوعي الخلايا. ويكمن مركز تحكم الهيكل الخلوي في تركيب يُعرف باسم الجسم المركزي أو السنتروسوم centrosome، وأهم أجزائه هو السنتريول centriole، الذي يتركب من حزمتين من الأنيبيبات على هيئة حرف «T» منفصل الجزأين. وفي مرحلة حرجة، في أثناء انقسام السنتروسوم، تنشأ عن كل أسطوانة من الاثنتين الموجودتين في السنتريول أسطوانة أخرى، ليتكون بالتالي سنتريولان على شكل حرف «T» وبعدها ينفصل كل سنتريول عن الآخر ليظهر وكأنه يسحب حزمة من الأنيبيبات معه. وبطريقةٍ ما، تصل ألياف الأنيبيبات هذه بين جزئي السنتروسوم المنقسم وجدائل DNA المنفصلة في نواة الخلية، وبعدها تنفصل جدائل DNA. وتكون هذه العملية هي البداية لانقسام الخلية.

لا تحدث هذه العملية في الخلايا العصبية لأن الخلايا العصبية لا تنقسم، ولذلك فلا بد أن الأنيبيبات التي توجد بها تؤدي وظيفة أخرى. فما عملها في الخلايا العصبية؟ من المحتمل أنها تؤدي وظائف عديدة، بما في ذلك نقل جزيئات الناقلات العصبية داخل الخلية، لكن هناك وظيفة واحدة يبدو أن للأنيبيبات دورًا فعّالًا فيها تتمثل في تحديد قدرات المشابك. في الشكل (٣-١٧)، نعرض صورة مكبرة لخلية عصبية ومشبك، ويتضح أيضًا من الشكل المواقع التقريبية للأنيبيبات وكذلك ألياف الأكتين. ومن الوسائل التي قد تتأثر بها قدرة أحد المشابك بالأنيبيبات، التأثير على طبيعة العمود الفقري الشجيري (شكل ٣-١٧). وتظهر هذه الأعمدة الفقرية في كثير من المشابك، وتستطيع أن تنمو أو تنكمش بوضوح أو — من ناحية أخرى — تغير طبيعتها. ويمكن أن تنتج هذه التغييرات عن التغييرات التي تحدث في الأكتين بداخلها، حيث إن الأكتين أحد المكونات الرئيسية في آلية الانقباض العضلي. وتستطيع الأنيبيبات المجاورة التأثير بقوة على هذا الأكتين، الذي يستطيع بدوره أن يؤثر على شكل اتصال المشبك أو خصائصه العازلة للكهرباء. وتوجد على الأقل طريقتان أخريان تستطيع من خلالهما الأنيبيبات الإسهام في التأثير في قدرات المشابك، فهي تشارك بالتأكيد في نقل المواد الكيميائية الخاصة بالناقلات العصبية التي تبث الإشارات من إحدى الخلايا العصبية إلى التي تليها. كما أن الأنيبيبات هي التي تحمل تلك المواد الكيميائية خلال المحاور العصبية والزوائد الشجيرية، ولذلك يؤثر نشاطها على تركيز هذه المواد الكيميائية في نهاية المحور العصبي وفي الزوائد الشجيرية، وهذا بدوره يمكن أن يؤثر على قدرة المشابك. ويتضح تأثير آخر للأنيبيبات يتمثل في نمو الخلية العصبية وانحلالها، الأمر الذي يغير شبكة الاتصالات العصبية إلى حد بعيد.

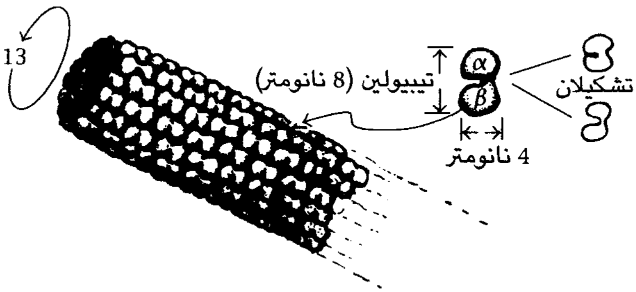
إلام تشير الأنيبيبات؟ يوضح الشكل (٣-١٨) مخططًا لإحدى الأنيبيبات التي هي أنابيب صغيرة تتكون من بروتينات تسمى التيبيولين tubulin، والتي تُعتبر مهمة من نواح عدة. يبدو أن بروتينات التيبيولين لها (على



شكل ٣-١٧: تكبح الكلاثرينات clathrins (ونهايات الأنيبيبات) الحبات المشبكية الخاصة بالمحور العصبي ويبدو أن كليهما تشاركان في التأثير على قدرة المشابك. ويمكن أن يحدث هذا من خلال خيوط الأكتين الموجودة في الأعمدة الفقرية الشجيرية.

الأقل) حالتان متباينتان، أو تشكيلان[١] conformations، وتستطيع أن تتحول من تشكيل إلى الآخر، ومن الواضح أنه يمكن إرسال الرسائل من خلال هذه الأنابيب. وفي الواقع، كان للعالم ستيورات هاميروف Stuart Hameroff وزملائه أفكار مثيرة حول كيفية إرسال الإشارات على امتداد الأنابيب. وطبقًا لهاميروف، ربما تعمل الأنيبيبات بمنزلة أوتوماتون خلوي أو آلية خلوية cellular automaton ويمكن إرسال الإشارات المعقدة من خلالها. والآن حاول أن تفكر في التشكيلين المختلفين لكل تيبيولين على أنهما يمثلان الحالة 0 والحالة 1 لأي جهاز كمبيوتر ديجيتال. لذلك فإن أنيبيبًا واحدًا يستطيع بمفرده أن يعمل وكأنه جهاز كمبيوتر ولا بد أن نضع هذا الأمر في الاعتبار عند التعرف على وظائف الخلايا العصبية. ولا تعمل كل

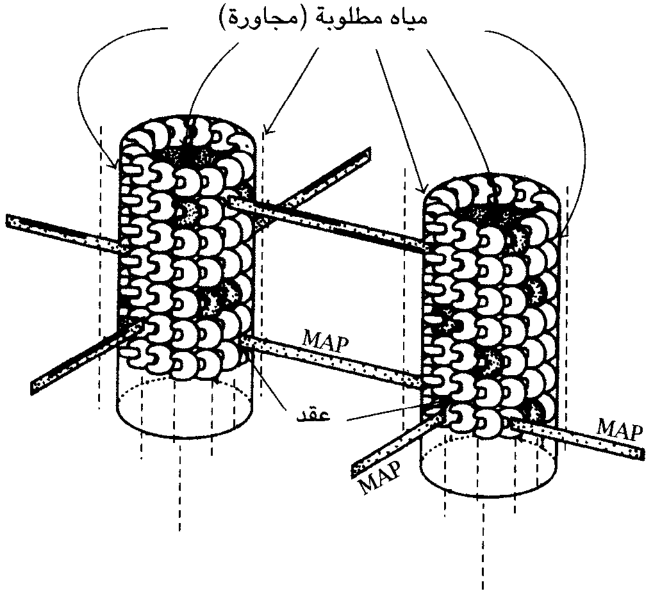
[١] التشكيل: هو كيفية التعامل مع الشكل والهيئة في جسم ما.



شكل ٣-١٨: أنيبيب؛ وهو أنبوب مجوف يتكون عادةً من ١٣ عمودًا من دايمرات dimmers التيبيولين، ويبدو أن كل جزيء تيبيولين قادر على تكوين تشكيلين (على الأقل).

خلية عصبية فقط بمنزلة مفتاح تشغيل، لكنها تشتمل أيضًا على العديد من الأنيبيبات وكل أنيبيب بوسعه أن يفعل العديد من الوظائف بالغة التعقيد.

بذلك أعتقد أن أفكاري باتت واضحة، وربما تكون لميكانيكا الكم أهمية في فهم هذه العمليات. وأحد الأمور التي أثارت اهتمامي بخصوص الأنيبيبات لأقصى درجة هو أنها أنابيب. ولكونها أنابيب، فثمة احتمالية جديرة بالتصديق ظاهريًّا تتمثل في أنها قد تكون قادرة على عزل ما يحدث داخلها عن النشاط العشوائي في الوسط المحيط. وفي الفصل الثاني زعمت أننا في حاجة إلى نوع جديد من فيزياء الاختزال الموضوعي **OR**، وإذا كان لهذا صلة بمحور حديثنا، فلا بد أن تكون هناك تحركات كتل كمية متراكبة معزولة تمامًا عن الوسط المحيط. ومن الممكن جدًّا أن يوجد داخل الأنابيب أحد أنواع النشاط المترابط كميًّا واسع النطاق الذي يشبه الموصل الفائق. ويمكن أن يكون لتحرك الكتلة الملحوظ تأثير فقط عندما يبدأ هذا النشاط في الاتحاد مع هيئتي التيبيولين من (نوع هاميروف)، حيث يخضع الآن السلوك «الآلي الخلوي» إلى التراكب الكمي، وفي الشكل (٣-١٩) عرض لما يمكن أن يحدث في هذه الحالة.



شكل ٣-١٩: قد تدعم منظومات الأنيبيبات داخل (مجموعات من) الخلايا العصبية النشاط المترابط كميًّا واسع النطاق وحدوث الاختزال الموضوعي الفردي الذي يكوّن الأحداث المقصودة. لذا فإنه من المطلوب عزل هذا النشاط عزلًا فعّالًا، من المحتمل عن طريق طلب المياه الذي يحيط بالأنيبيبات. وتستطيع منظومة اتصال داخلي خاصة بالبروتينات المصاحبة للأنيبيبات المعروفة بالاختصار MAP «تعديل» هذا النشاط، باتصالها بالأنيبيبات عند «العُقد».

كجزء من هذه الصورة، لا بد من حدوث نوع ما من الذبذبة الكمية المترابطة داخل الأنابيب التي تحتاج للامتداد على مساحات كبيرة جدًّا من المخ. وكانت هناك اقتراحات عن هذا النوع العام طرحها هربرت فروليش Herbert Frölich قبل سنوات عديدة، وقد تقبل البعض سطحيًّا أنه ربما توجد أشياء في المنظومات البيولوجية لها الخاصية نفسها، إذ يبدو أن

الأنيبيبات من المكونات الجيدة للتركيبات التي قد يحدث بداخلها هذا النشاط المترابط كميًّا واسع النطاق. وباستخدامي التعبير «واسع النطاق»، نتذكر أنني في الفصل الثاني وصفت لغز EPR وتأثيرات اللاموضعية الكمية، التي توضح أن التأثيرات المنفصلة بعضها عن بعض انفصالًا كبيرًا لا يمكن اعتبارها منفصلة. كما أن التأثيرات اللاموضعية المماثلة لهذه التأثيرات تحدث في ميكانيكا الكم ولا يمكن فهمها في إطار شيء منفصل عن شيء آخر، حيث يحدث نوع ما من النشاط الكوني.

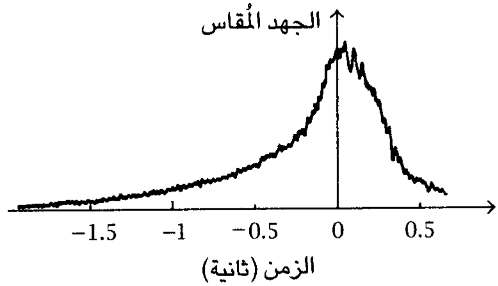
يبدو لي أن الوعي شيء كوني، لذلك فإن أية عملية فيزيائية مسئولة عن الوعي لا بد أن تكون ذات خاصية كونية بصفة أساسية. والترابط الكمي ملائم بالتأكيد لأداء هذه المهمة في هذا الإطار. وحتى يكون الترابط الكمي واسع النطاق ممكنًا، نحن في حاجة إلى درجة عالية من العزل كالذي توفره جدران الأنيبيبات. من ناحية أخرى، نحن أيضًا في حاجة إلى درجة أعلى من العزل عندما تبدأ هيئات التيبيولين في الاشتراك في هذه العملية. وهذا العزل الإضافي المطلوب عن البيئة المحيطة قد يحدث من خلال مياه مطلوبة من خارج الأنيبيبات مباشرة. وهذه المياه المطلوبة (المعروف عنها أنها توجد في الخلايا الحية) تبدو وكأنها مكون مهم لأي عزل مترابط كميًّا يحدث داخل الأنابيب. ومع أن هذه العملية تبدو شاقة، فإنه ليس من غير المعقول كليةً أن تكون تلك هي الحالة.

قد يتعين على الذبذبات الكمية الحادثة داخل الأنابيب أن تتحد بطريقة ما مع وظيفة الأنيبيبات، وبالتحديد النشاط الآلي الخلوي الذي يتحدث عنه هاميروف، لكن يتعين الآن أن تتحد فكرته مع ميكانيكا الكم. وبناءً عليه، ينبغي لنا الآن ألا نقتصر فقط على النشاط الحسابي بالمعنى المعتاد، بل نسعى للحصول أيضًا على الحساب الكمي الذي يضم حالات تراكب لأنشطة مختلفة عديدة. إذا كانت تلك هي القصة بأكملها، فإننا نكون بذلك لا نزال عند المستوى الكمي، وعند نقطة معينة قد تصبح الحالة الكمية مرتبطة بالوسط المحيط، وحينئذٍ نصبح سريعًا في المستوى الكلاسيكي بطريقة عشوائية على ما يبدو. وكل هذه العملية تحدث بتوافق مع إجراء

R المعتاد — أو اختزال متجه الحالة — لميكانيكا الكم. وفي الواقع لن تكون هذه العملية ذات فائدة إذا كنا نريد أن تؤدي عدم القابلية للقياس الوظيفة المنوطة بها على أكمل وجه. من أجل ذلك، يتعين على أوجه الاختزال الموضوعي OR غير القابلة للقياس أن تظهر نفسها، وهذا يتطلب عزلًا تامًّا. لذلك، أزعم أننا نحتاج إلى شيء ما في المخ يكون معزولًا عزلًا كافيًا لتكون أمام فيزياء الاختزال الموضوعي الجديدة فرصة لتؤدي وظيفة مهمة. وما نحتاج إليه هو أن تكون العمليات الحسابية المتراكبة الخاصة بالأنيبيبات، بمجرد أن تبدأ عملها، معزولة بدرجة كافية حتى تستطيع هذه الفيزياء الجديدة حقًّا أن تؤدي وظائفها بفاعلية.

وهكذا فإن الصورة التي أعرضها تتمثل في أن تستمر هذه العمليات الحسابية الكمية لبعض الوقت وتحافظ على نفسها معزولة عن باقي المادة لفترة كافية — ربما لما يقرب من ثانية — تتيح لأنواع المعايير التي كنت أتحدث عنها أن تأخذ مكان الإجراءات الكمية القياسية، وللعناصر غير القابلة للقياس أن تبدأ في أداء دورها المنوطة به، وأن نحصل غلى شيء مختلف اختلافًا جوهريًّا عن نظرية الكم القياسية.

بطبيعة الحال، ثمة قدر كبير من الافتراضات في العديد من هذه الأفكار، لكنّ هذه الأفكار تعرض احتمالية مؤكدة إلى حد ما لصورة أكثر كمية وتحديدًا للعلاقة بين الوعي والعمليات الفيزيائية الحيوية مقارنةً بالتي كانت تُقدم في المناهج الأخرى. وعلى الأقل نستطيع البدء في إجراء عملية حسابية لمعرفة مثلًا عدد الخلايا العصبية المفترض اشتراكها كي يصبح نشاط الاختزال الموضوعي ذا صلة، والمطلوب هو تقدير المقياس الزمني T الذي تحدثت عنه في نهاية الفصل الثاني. بعبارة أخرى، بافتراض أن الأحداث الواعية على صلة بأحداث الاختزال الموضوعي، ما القيمة التي يمكن تقديرها للمقياس الزمني T؟ وما الفترة الزمنية اللازمة للوعي؟ يوجد نوعان من التجارب متعلقان بهذه الأفكار، والاثنان يخصان ليبت Libet وزملائه؛ أحدهما يتناول الإرادة الحرة أو الوعي الفعّال والآخر خاص بالشعور أو الوعي السلبي.

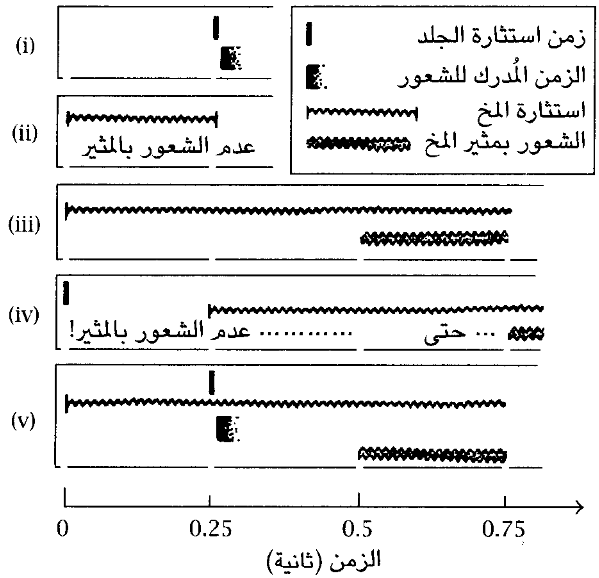


(أ)

شكل ٣-٢٠(أ): تجربة كورنهابر؛ أعاد إجراءها وتعديلها فيما بعد ليبت وزملاؤه. يبدو أن قرار تحريك الإصبع للضغط على الزر يمكن تنفيذه عند الزمن 0، لكنّ الإشارة المسبقة (التي قيس متوسطها في تجارب عديدة) تقترح وجود «معرفة مسبقة» بنية تحريك الإصبع.

في البداية، دعنا ندرس بإمعان الإرادة الحرة، ففي تجربتَيْ ليبت وكورنهابر Kornhuber، طُلِب من شخص أن يضغط على زر، في وقت تحدد كليةً بإرادته. ووُضِعَت أقطاب كهربية (أو إلكترودات electrodes) على رأس الشخص للكشف عن النشاط الكهربي في مخه. وكُررت التجربة عدة مرات، وأُخذت متوسطات النتائج (شكل ٣-٢٠ القسم أ) وجاءت النتيجة النهائية لتدل على مؤشرات واضحة لهذا النشاط الكهربي الذي استمر نحو ثانية كاملة بداية من الوقت الذي اعتقد فيه الشخص أنه اتخذ قرارًا فعليًّا. ومن ثَم يبدو أن الإرادة الحرة تتضمن نوعًا ما من التأخير الزمني الذي بلغ ثانية واحدة.

في واقع الأمر، إن التجارب الأجدر بالملاحظة هي التجارب السلبية التي يُعد إجراؤها أكثر صعوبة. على ما يبدو فإن هذه التجارب تستغرق نصف ثانية من النشاط داخل المخ قبل أن يصبح الشخص مدركًا بصورة سلبية حدوث شيء ما (شكل ٣-٢٠ القسم ب). في هذه التجارب، توجد وسائل



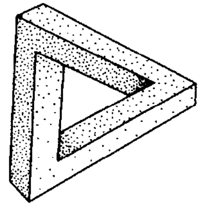
(ب)

شكل ٣-٢٠(ب): تجربة ليبت. (i) «يبدو» أن عملية استثارة الجلد قد شعر الشخص بها في وقت الاستثارة الفعلي تقريبًا. (ii) لم يشعر الشخص باستثارة القشرة عند الاستثارة لأقل من نصف ثانية. (iii) شعر الشخص باستثارة القشرة عند حدوث الاستثارة لأكثر من نصف ثانية، وذلك بدءًا من نصف الثانية فصاعدًا. (iv) يمكن لعملية الاستثارة القشرية أن «تحجب عكسيًّا» استثارة سابقة حدثت للجلد، مما يشير إلى أن الوعي باستثارة الجلد لم يحدث بالفعل وقت الاستثارة القشرية. (v) إذا طُبقت استثارة الجلد بعد فترة قصيرة من الاستثارة القشرية، فإن وعي الجلد «يؤجل» وهو ما لا يحدث للوعي القشري.

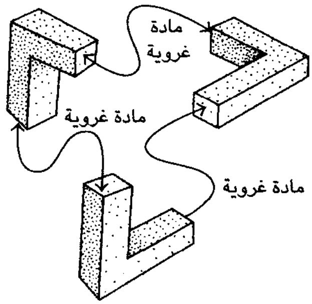
لإعاقة الخبرة الواعية بحدوث عملية استثارة للجلد، تبدأ عملها بالفعل حتى قرابة نصف ثانية بعد هذه العملية! في هذه الحالات، عندما لا يُنفذ إجراء

الإعاقة هذا، يعتقد الشخص أن خبرة استثارة الجلد قد حدثت في الوقت الفعلي لعملية الاستثارة، في الوقت الذي يكون فيه إجراء الإعاقة قد حدث حتى نصف ثانية بعد الوقت الفعلي لعملية الاستثارة. في حقيقة الأمر، تُعد هذه التجارب غاية في الإرباك، خاصةً إذا ما أُجريت معًا. وذلك، حيث إنها تقترح أن الإرادة الواعية تحتاج إلى نحو ثانية واحدة، والشعور الواعي يحتاج إلى نصف ثانية. وإذا تخيلنا أن الوعي هو شيء ينفذ إجراءً ما، إذن لأصبحنا غالبًا أمام تناقض. فنحن نحتاج إلى نصف ثانية قبل أن نصبح على وعي بحدث ما، ثم نحاول توظيف وعينا من أجل فعل شيء. ونحتاج إلى ثانية أخرى لإرادتنا الحرة لأداء ذلك الشيء، بمعنى أننا نحتاج إجمالًا إلى ثانية ونصف الثانية. لذلك إذا تطلب أي شيء استجابة إرادية واعية، فإننا نصبح في حاجة إلى نحو ثانية ونصف الثانية قبل أن نتمكن فعليًّا من استخدام هذا الشيء. والآن حسنًا، أعتقد أن هذا أمرٌ من الصعوبة بمكان فهمه، ولكن على سبيل المثال دعنا نطبق هذا الأمر على مناقشة عادية. وفي هذا الصدد، يبدو لي أنه مع أن قدرًا كبيرًا من المناقشة قد يحدث بصورة تلقائية وغير واعية، فإن الحقيقة التي تؤكد أن الأمر يستغرق ثانية ونصف الثانية لحدوث استجابة واعية تبدو لي بالغة الغرابة.

أما عن وجهة نظري فيما يخص هذا الموضوع، فتتمثل في أنه ربما يوجد شيء في الطريقة التي نفسر بها هذه التجارب يشكل الافتراض الذي يقول إن الفيزياء التي نستخدمها هي بصفةٍ أساسية فيزياء كلاسيكية. ولنتذكر مثلًا تجربة اختبار القنابل التي تحدثنا فيها عن الحقائق المضادة وحقيقة أن الأحداث المضادة للحقيقة قد يكون لها تأثير على الأشياء، مع أنها لم تحدث فعليًّا. والنوع المعتاد للمنطق الذي نستخدمه من الطبيعي أن يميل إلى الخطأ، إن لم نلتزم الحرص. ويتعين أن نضع في اعتبارنا كيف تعمل المنظومات الكمية، ولذا فمن المحتمل وجود أشياء مخادعة تحدث في عمليات تقدير الزمن هذه بسبب اللاموضعية الكمية والحقائق المضادة الكمية. ومن الصعوبة البالغة فهم اللاموضعية الكمية في إطار النسبية الخاصة. ووجهة نظري الشخصية تتمثل في أنه لفهم اللاموضعية الكمية،



أين الاستحالة؟



شكل ٣-٢١: مثلث مستحيل؛ لا يمكن تحديد موضع «الاستحالة»، إلا أنه يمكن تعريفها في إطار رياضي دقيق باعتبارها فكرة تجريدية مستخلصة من «لصق» أجزاء تشكل تركيبها.

نحتاج إلى نظرية جديدة بصورة جذرية. ولن تكون هذه النظرية الجديدة مجرد تعديل طفيف لميكانيكا الكم، لكنها ستكون شيئًا مختلفًا عن ميكانيكا الكم القياسية بقدر اختلاف النسبية العامة عن الجاذبية النيوتنية. يعني ذلك أنها لا بد من أن تكون شيئًا له إطار تصوري مختلف كليةً. وفي هذه الصورة، سوف تكون اللاموضعية الكمية لبنة في هيكل النظرية.

في الفصل الثاني، اتضح أن اللاموضعية هي شيء مع كونه محيرًا جدًّا، فإنه لا يزال بالإمكان وصفه رياضيًّا. والآن دعوني أوضح لكم صورة لمثلث مستحيل — أي غير قابل للتنفيذ — في الشكل (٣-٢١). وقد تتساءل «أين الاستحالة؟»، ونرد عليك بسؤال آخر: هل يمكنك تحديد موضعها؟ في الواقع، يمكنك تغطية أجزاء عديدة من الصورة، وأيًّا كان الجزء الصغير من المثلث الذي تغطيه، فإن الصورة ستصبح مستحيلة. وبناءً عليه، لا تستطيع

أن تقول إن الاستحالة توجد في أي موضع معين من الصورة؛ فالاستحالة تُعد سمة للتركيب بأكمله. ومع ذلك توجد أساليب رياضية دقيقة نستطيع أن نتعامل بها مع مثل هذه الأشياء، ويمكن إجراء هذا عن طريق فصلها إلى أجزاء، ولصقها معًا واستخلاص أفكار رياضية مجردة معينة من الشكل الإجمالي المفصّل للأجزاء الملتصقة. والجدير بالذكر أن فكرة التشابه المرافق أو الكوهومولوجي cohomology هي الفكرة المناسبة في هذه الحالة، حيث إنها تقدم لنا وسيلة لحساب درجة الاستحالة في هذا الشكل. ويُعد هذا نوعًا من أنواع الرياضيات اللاموضعية التي يمكن أن تكون متضمنة في النظرية الجديدة.

ليس من قبيل المصادفة أن يتشابه الشكل (٣-٢١) مع الشكل (٣-٣)! حيث إن الشكل (٣-٣) رُسم عمدًا من أجل التأكيد على أحد عناصر التناقض. وفي الواقع، هناك شيء غامض عن الأسلوب الذي ترتبط به هذه العوالم الثلاثة بعضها مع بعض؛ فكل منها يبدو — على الأغلب — وكأنه «ينشأ» من جزء صغير من سابقه. من ناحية أخرى، كما هو موضح في الشكل (٣-٢١)، فإنه بمزيد من الفهم قد نصبح قادرين على فهم هذا الغموض فهمًا تامًّا أو كشف بعض منه. ومن المهم معرفة الأمور التي يكتنفها الغموض أو الألغاز عندما تحدث، لكن مجرد حدوث شيء غامض أو بالغ الإرباك لا يعني أننا لن نستطيع أبدًا فهمه.

References

Albrecht-Buehler, G. (1981) Does the geometric design of centrioles imply their function? *Cell Motility* **1**, 237-45.

Albrecht-Buehler, G. (1991) Surface extensions of 3T3 cells towards distant infrared light sources, *J. Cell Biol.* **114**, 493-502.

Aspect, A., Grangier, P., Roger, G. (1982). Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm *Gedankenexperiment:* a new violation of Bell's inequalities, *Phys. Rev. Lett* **48**, 91-4.

Beckenstein, J. (1972) Black holes and the second law, *Lett. Nuovo Cim.*, **4**, 737-40.

Bell, J.S. (1987) *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (Cambridge University Press, Cambridge).

Bell, J.S. (1990) Against measurement, *Physics World* **3**, 33-40.

Berger, R. (1966) The undecidability of the domino problem, *Memoirs Amer. Math. Soc.*, No. 66 (72 pp.).

Bohm, D. and Hiley, B. (1994). *The Undivided Universe.* (Routledge, London).

Davenport, H. (1968) *The Higher Arithmetic*, 3rd edn, (Hutchinson's University Library, London).

Deeke, L., Grötzinger, B., and Kornhuber, H.H. (1976). Voluntary finger movements in man: cerebral potentials and theory, *Biol. Cybernetics*, **23**, 99.

Deutch, D. (1985) Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer, *Proc. Roy. Soc. (Lond.)* **A400**, 97-117.

DeWitt, B.S. and Graham, R.D., eds. (1973) *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics.* (Princeton University Press, Princeton).

Diósi, L. (1989) Models for universal reduction of macroscopic quantum fluctuations, *Phys. Rev.* **A40**, 1165-74.

Fröhlich, H. (1968). Long-range coherence and energy storage in biological systems, *Int. J. of Quantum. Chem.*, **II**, 641-9.

Gell-Mann, M. and Hartle, J.B. (1993) Classical equations for quantum systems, *Phys. Rev. D* **47**, 3345-82.

Geroch, R. and Hartle, J. (1986) Computability and physical theories, *Found. Phys.* **16**, 533.

Gödel, K. (1931) Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter System 1, *Monatshefte für Mathematik und Physik* **38**, 173-98.

Golomb, S.W. (1966) *Polyominoes.* (Scribner and Sons, London).

Haag, R. (1992) *Local Quantum Physics: Fields, Particles, Algebras*, (Springer-Verlag, Berlin).

Hameroff, S.R. and Penrose, R. (1996). Orchestrated reduction of quantum coherence in brain microtubules - a model for consciousness. In *Toward a Science of Consciousness:*

Contributions from the 1994 Tucson Conference, eds, S. Hameroff, A. Kaszniak and A. Scott (MT Press, Cambridge MA).

Hameroff, S.R. and Penrose, R., (1996). Conscious events as orchestrated space-time selections. *J. Consciousness Studies*, **3**, 36-53.

Hameroff, S.R. and Watt, R.C. (1982). Information processing in microtubules, *J. Theor. Biol.* **98**, 549-61.

Hawking, S.W. (1975) Particle creation by black holes, *Comm. Math. Phys.* **43**, 199-220.

Hughston, L.P., Jozsa, R., and Wooters, W.K. (1993) A complete classification of quantum ensembles having a given density matrix, *Phys. Letters* **A183**, 14-18.

Károlyházy, F. (1966) Gravitation and quantum mechanics of macroscopic bodies, *Nuovo Cim.* **A42**, 390.

Károlyházy, F. (1974) Gravitation and quantum mechanics of macroscopic bodies, *Magyar Fizikai PolyoirMat* **12**, 24.

Károlyházy, F., Frenkel, A. and Lukács, B. (1986) On the possible role of gravity on the reduction of the wave function. In *Quantum Concepts in Space and Time* eds. R. Penrose and C.J. Isham (Oxford University Press, Oxford) pp. 109-28.

Kibble, T.W.B. (1981) Is a semi-classical theory of gravity viable? In *Quantum Gravity 2: A Second Oxford Symposium*; eds C.J. Isham, R. Penrose and D.W. Sciama (Oxford University Press, Oxford) pp. 63-80.

Libet, B. (1992) The neural time-factor in perception, volition and free will, *Review de Métaphysique et de Morale*, **2**, 255-72.

Libet, B., Wright, E.W. Jr, Feinstein, B. and Pearl, D.K. (1979) Subjective referral of the timing for a conscious sensory experience, *Brain*, **102**, 193-224.

Lockwood, M. (1989) *Mind, Brain and the Quantum* (Basil Blackwell, Oxford).

Lucas, J.R. (1961) Minds, Machines and Gödel, *Philsophy* **36**, 120-4; reprinted in Alan Ross Anderson (1964) *Minds and Machines* (Prentice-Hall, New Jersey).

Majorana, E. (1932) Atomi orientati in campo magnetico variabile, *Nuovo Cimento* **9**, 43-50.

Moravec, H. (1988) *Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence* (Harvard University Press, Cambridge, MA).

Omnés, R. (1992) Consistent interpretations of quantum mechanics, *Rev. Mod. Phys.*, **64**, 339-82.

Pearle, P. (1989) Combining stochastic dynamical state-vector reduction with spontaneous localisation, *Phys. Rev.*, **A39**, 2277-89.

Penrose, R. (1989) *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics*, (Oxford University Press, Oxford).

Penrose, R. (1989) Difficulties with inflationary cosmology, in *Proceedings of the 14th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics*, ed. E. Fenves, *Annals of NY Acad. Sci.* **571**, 249 (NY Acad. Science, New York).

Pensore, R. (1991) On the cohomolgy of impossible figures [La cohomologie des figures impossibles], *Structural Topology [Topologie structurale]* **17**, 11-16.

Penrose, R. (1994) *Shadows of the Mind: An Approach to the Missing Science of Consciousness* (Oxford University Press, Oxford).

Penrose, R. (1996) On gravity's role in quantum state reduction, *Gen. Rel. Grav.* **28**, 581.

Percival, I.C. (1995) Quantum spacetime fluctuations and primary state diffusion, *Proc. R. Soc. Lond.* **A451**, 503-13.

Schrödinger, E. (1935) Die gegenwärtige situation in der Quantenmechanick, *Naturwissenschaftenp*, **23**, 807-12, 823-8, 844-9. (Translation by J.T. Trimmer (1980) in *Proc. Amer. Phil. Soc.*, **124**, 323-38).

Schrödinger, E. (1935) Probability relations between separated systems, *Proc. Camb. Phil. Soc.*, **31**, 555-63.

Searle, J.R. (1980) Minds, Brains and Programs, in *The Behavioral and Brain Sciences*, Vol. 3 (Cambridge University Press, Cambridge).

Seymore, J. and Norwood, D. (1993) A game for life, *New Scientist* **139**, No. 1889, 23-6.

Squires, E. (1990) On an alleged proof of the quantum probability law *Phys. Lett.* **A145**, 67-8.

Turing, A.M. (1937) On computable numbers with an application to the Entscheidungsproblem, *Proc. Lond. Math. Soc. (ser. 2)* **42**, 230-65.; a correction **43**, 544-6.

Turing, A.M. (1939) Systems of logic on ordinals, *P. Lond. Math. Soc.*, **45**, 161-228.

von Neumann, J. (1955) *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics.* (Princeton University Press, Princeton).

Wigner, E.P. (1960) The unreasonable effectiveness of mathematics in the physical sciences, *Commun. Pure Appl. Math.*, **13**, 1-14.

Zurek, W.H. (1991) Decoherence and the transition from quantum to classical, *Physics Today*, **44** (No. 10), 36-44.

الفصل الرابع

العقلية وميكانيكا الكم وتحقيق الاحتمالات

أبنر شيموني

مقـدمـة

إن ما يثير إعجابي في عمل روجر بنزوز لأقصى درجة يتمثل في توافق أجزاء بحثه؛ فهو يجمع بين الخبرة التقنية وروح الإقدام والتصميم على التوصل إلى لب الموضوع. وفي ذلك يتبع روجر النصيحة العظيمة التي أسداها هيلبرت التي تقول: «يتعين علينا أن نعلم، إذن فسوف نعلم[1].» وفيما يتعلق ببرنامج بحثه، فأنا أتفق معه حول ثلاثة موضوعات أساسية؛ أولها: أنه يمكن التعامل مع العقلية على نحو علمي، وثانيها: أن أفكار ميكانيكا الكم وثيقة الصلة بالقضية العقلية–البدنية. أما ثالث هذه الموضوعات: فيتمثل في أن مشكلة ميكانيكا الكم الخاصة بتحقيق الاحتمالات هي مشكلة فيزيائية بحتة لا يمكن حلها دون تعديل الشكلية الكمية. ومع ذلك فأنا أميل للشك في عدد من التفاصيل التي قدمها روجر لهذه الموضوعات الثلاثة ويحدوني الأمل أن يكون نقدي حافزًا له على إجراء تحسينات.

٤–١: العقلية ومكانتها في الطبيعة

خُصص ما يقرب من ربع الفصول الثلاثة السابقة من هذا الكتاب وكذلك نصف كتاب روجر Shadows of the Mind (المُشار إليه فيما بعد بالاختصار

SM) لترسيخ الخاصية اللاخوارزمية للقدرة الحسابية للإنسان. وقد زعم هيلاري بوتنام[٢] Hilary Putnam في تعقيبه على كتاب SM أنه توجد بعض الثغرات في المعالجة، منها: أن روجر تجاهل إمكانية وجود برنامج لآلة تورنج يحاكي القدرة الحسابية للإنسان، لكنّ هذا الانتقاد غير سليم بالإثباتات والبراهين، وإمكانية أن يكون هذا البرنامج على درجة من التعقيد تجعل العقل البشري غير قادر على فهمه عمليًّا. وأنا شخصيًّا، لست مقتنعًا برد روجر على بوتنام[٣]، لكن من الجانب الآخر لا أعرف بصورة كافية بوجود نظرية مثبتة للبت في هذا الأمر بثقة. لكن يبدو لي أن القضية تمس اهتمامات روجر الأساسية، وأن روجر نفسه من متسلقي الجبال الذين يحاولون تسلق الجبل الخطأ. وأطروحته الرئيسية، التي تركزت على أن ثمة شيئًا يخص الأفعال العقلية لا يمكن لأي كمبيوتر التوصل إليه، لا تعتمد على ترسيخ الخاصية اللاخوارزمية للعمليات الحسابية البشرية. وكإضافة لجداله الطويل مع جودل، قدم روجر بالفعل (في كتابه SM في الصفحتين ٤٠-١) برهان «الغرفة الصينية» لجون سيرل الذي ينص على أن أية عملية حسابية صحيحة تجريها آلة لا تشتمل على أي فهم. وجوهر الجدال أن أي إنسان يمكن تدريبه ليتصرف سلوكيًّا كإنسان آلي باتباع التعليمات المنطوقة المقدمة باللغة الصينية، حتى لو كان هذا الإنسان لا يفهم اللغة الصينية ويعلم هذه الحقيقة. ويستطيع أي شخص يجري عملية حسابية بصورة صحيحة باتباع هذه التعليمات أن يقارن مباشرةً بين الخبرة العادية بالحساب عن طريق الفهم والخبرة غير العادية بالحساب الخاصة بالآلة. الجدير بالذكر أن الحقيقة الرياضية المُتوصل إليها بالحساب الذي نحن بصدده قد تكون تافهة للغاية، ومع ذلك فإن الاختلاف بين الحساب الآلي والفهم واضح بالحدس.

إن ما يدافع عنه سيرل — متفقًا في ذلك مع روجر، فيما يتعلق بالفهم الرياضي — ينطبق أيضًا على الجوانب الأخرى للخبرة الواعية، أي ينطبق على نوعية الإحساس وعلى أحاسيس الألم والسعادة وعلى مشاعر الإرادة وعلى القصدية intentionality (المعلومات المستندة إلى الخبرة الشخصية التي

تكون حول الأشياء أو المفاهيم أو المقترحات) ... إلخ. وفي سياق الفلسفة العامة للفيزيائية physicalism، توجد استراتيجيات متعددة لتفسير هذه الظواهر(٤). وفي النظريات ثنائية الجانب، تعتبر هذه الخبرات أوجهًا لحالات مخية[١] معينة، وتعتبر نظريات أخرى أن أية خبرة عقلية تماثل مجموعة من الحالات المخية، وهذه المجموعة بالغة الدقة حتى إنه يتعذر إعطاء أية ميزة فيزيائية واضحة لها، لذلك من المستحيل «اختزال» مفهوم عقلي إلى مفاهيم فيزيائية، وتعتبر النظريات الوظيفية أن الخبرات العقلية مماثلة لبرامج نظامية يمكن أن تفعلها من حيث المبدأ العديد من النظم الفيزيائية المختلفة مع أنها تُوظف بالفعل من قِبل شبكات الخلايا العصبية بالاعتماد على شيء آخر. وقد تمثل جدال فيزيائي آخر تكرر عدة مرات — وأكدته بصفة خاصة نظريات ثنائية الجانب، لكن استخدمته أنواع متعددة من الفيزيائية — في أن أي كيان تميزه مجموعة من الخصائص قد يكون مماثلًا لكيان آخر تميزه مجموعة مختلفة تمامًا من الخصائص. وقد تشمل الخصائص أنماطًا شعورية متباينة، أو قد يكون أحدها شعوريًّا والآخر ميكروفيزيائيًّا. ويتقدم الجدال بعد ذلك مقترحًا أن تماثل حالة عقلية مع حالة مخية (أو مع مجموعة من الحالات المخية أو مع برنامج) يعد مثالًا لهذا المنطق العام للتماثل. وهنا يبدو لي أن هناك خطأً متأصلًا في هذا الاستنتاج؛ فعندما يماثل شيء يتميز بنمط شعوري شيئًا آخر يتميز بنمط شعوري آخر، فإن ذلك يشير إلى وجود مرجعية ضمنية إلى سلسلتين سببيتين، ولكل منهما طرفان تشتركان فيهما؛ أحدهما يتمثل في عنصر ما فردي والآخر في مسرح وعي المدرِك، لكن السلسلتين تختلفان في الروابط السببية الوسطية في البيئة وفي الأدوات الشعورية والمعرفية للمدرِك. وعندما تتماثل حالة مخية مع حالة وعي، طبقًا للتوضيح ثنائي الجانب للفيزيائية، فلن تكون هناك صعوبة في التعرف على شيء مشترك باعتباره طرفًا للسلسلتين، وهذا الشيء في الواقع هو الحالة المخية، لأن الفيزيائية ملتزمة بالأولوية

---

[١] حالة مخية brain state: هي حالة فيزيائية-كيميائية للمخ، وفكرتها الفلسفية تتمثل في آلية تلعب دورًا توضيحيًّا في علم المخ.

الأنطولوجية أو الوجودية[2] للوصف الفيزيائي، لكن الطرف الآخر — أي مسرح وعي المدرِك — فإنه يكون غائبًا. أو ربما يتعين علينا أن نقول إنه يوجد غموض يتخلل النظرية ثنائية الجانب، نظرًا لاعتبار المسرح المشترك ضمنيًّا موضعًا للدمج والمقارنة بين الجانب الفيزيائي والجانب العقلي، لكن على الجانب الآخر، لا توجد حالة مستقلة لهذا المسرح، إذا كانت الفيزيائية صحيحة.

وثمة جدال ذو صلة مناهض للفيزيائية يعتمد على مبدأ فلسفي أسميه «المبدأ الفينومينولوجي[3]» (لكنني أرحب بأي إسهامات لأسماء أفضل مقترحة)؛ ويُقصد بهذا المبدأ أنه أيًا كانت الأشياء الموجودة بالفعل (أو الأنطولوجيات) التي تعترف أية فلسفة مترابطة بوجودها، فإن هذه الأشياء لا بد أن تفسر بصورة كافية مظهرها الخارجي. ولهذا المبدأ نتيجة تقول إن الفيزيائية غير مترابطة، إلى جانب أن أية أنطولوجية فيزيائية قد تفترض — وعادةً ما تفترض — تدرجًا أنطولوجيًّا، يتكون مستواه الأساسي على نحو نموذجي من الجسيمات أو المجالات الأولية، وتتشكّل المستويات الأعلى من تركيبات تألفت من كيانات أولية. وهذه التركيبات يمكن تصنيفها بطرق مختلفة؛ فهناك الطريقة التفصيلية التي تعطي الحالة الميكروسكوبية لأي نظام بالتفصيل، والطريقة العامة التي تقدر إجمالي أو متوسط الوصف التفصيلي أو تكمله، والطريقة الترابطية التي تعتمد على الروابط السببية بين نظم التركيب موضع الاهتمام والأدوات أو الأشخاص القائمين على عملية الإدراك، مع أي من هذه الطرق تتوافق المظاهر الشعورية في ظل هذا التصور للطبيعة؟ في الحقيقة، إنها لا تتوافق مع الطريقة التفصيلية إلا إذا اشتملت الفيزياء الأساسية على الخصائص العقلية، وهو ما يتعارض مع برنامج الفيزيائية. بالإضافة إلى ذلك، لا تتواءم المظاهر الشعورية مع الوصف العام دون وجود نظرية مماثلة للنظرية ثنائية الجانب، التي شُرحت نقاط ضعفها في الفقرة السابقة. وبالمثل أيضًا لا تتواءم مع الطريقة الترابطية

[2] نسبة إلى علم الوجود أو الأنطولوجيا antology.

[3] نسبةً إلى علم الظواهر أو الفينومينولوجيا phenomenology.

إلا إذا ارتبط الشيء سببيًّا بموضوع حساس، وإجمالًا لا تتوافق المظاهر الشعورية مع أية طريقة في أية أنطولوجية فيزيائية.

مما لا شك فيه أن هاتين المعالجتين المناهضتين للفيزيائية تعدان بسيطتين، لكنهما قويتان؛ إذ إنه من الصعوبة بمكان أن نرى كيف يمكن معارضتهما وكيف يمكن النظر إلى العقل بوصفه مشتقًّا أنطولوجيًّا، لولا وجود بعض الاعتبارات العديدة الخطيرة والهائلة. وأول هذه الاعتبارات يتمثل في أنه ليس ثمة أي دليل على الإطلاق على انفصال العقلية عن الأجهزة العصبية عالية التطور. وكما يقول روجر: «إذا كان العقل جزءًا خارجيًّا منفصلًا عن الجسم الفيزيائي، فمن الصعوبة التوصل إلى سبب ارتباط كثير جدًّا من صفاته المميزة ارتباطًا وثيقًا بالمخ الفيزيائي»، (SM صفحة ٣٥٠). أما الاعتبار الثاني فيتمثل في الدلائل المتعددة على أن التركيبات العصبية هي نواتج لعملية تطور الكائنات البدائية المجردة من هذه التركيبات، وفي الحقيقة، إذا كان برنامج التطور ما قبل الحيوي صحيحًا أصبح ممكنًا إرجاع السلالة إلى الجزيئات والذرات اللاعضوية. والاعتبار الثالث هو أن الفيزياء الأساسية لا تعزو أي خصائص عقلية لهذه المكونات اللاعضوية.

تشتمل «فلسفة الكائنات الحية»[٥] لإيه. إن. وايتهيد A. N. Whitehead (التي اعتمدت على المونادولوجيا monadology الخاصة بليبنتز Leibniz)، على أنطولوجية عقلية تتناول كل الاعتبارات الثلاثة السابقة، ولكن بتحفظ شديد. وتتمثل كيانات هذه الأنطولوجية الجوهرية في «الأحداث الفعلية» التي لا تعتبر كيانات دائمة، بل كميات زمكانية، وكل كمية منها تُمنح — عادةً بمستويات بالغة الانخفاض — خصائص عقلية مثل «الخبرة» و«البداهة الشخصية» و«الرغبة». ومعاني هذه المفاهيم مشتقة من العقلية عالية المستوى التي نعرفها بالاستبطان، لكنها مستنتجة على نحو هائل من هذه القاعدة المألوفة. وأي جسيم فيزيائي أولي — يعتبره وايتهيد سلسلة زمنية من الأحداث — يمكن تعريفه، بأقل قدر من الحيرة، من خلال مفاهيم الفيزياء العادية، لأن خبرته غامضة ورتيبة ومكررة، لكن مع ذلك توجد بعض الحيرة، حيث إن: «فكرة الطاقة الفيزيائية، التي تعتمد عليها

الفيزياء، لا بد من إدراك أنها مستخلصة من الطاقة المركّبة — الانفعالية والهادفة — الراسخة في الشكل الذاتي للتركيب النهائي الذي يستكمل فيه كل حدث ذاته[٦]». والجدير بالذكر أن تطور مجموعات الأحداث عالية التنظيم هو فقط الذي يسمح للعقلية البدائية protomentality أن تصبح على درجة من الوعي المكثف والمتكامل والمترابط: «تبقى وظائف المادة غير العضوية كما هي بين وظائف المادة الحية، ويبدو أنه في الأجسام الحية، يتحقق تنسيق يبرز بعض الوظائف الراسخة في الأحداث النهائية[٧].»

لم يظهر اسم وايتهيد في فهرس كتاب SM، لكنّ ظهوره الوحيد في كتاب The Emperor's New Mind[٨] يشير إلى كتاب Principia Mathematica لكل من وايتهيد وبرتراند راسل Bertrand Russell. وفي الحقيقة، لا أعرف أسباب تجاهل روجر له، لكنني أستطيع ذكر عدة اعتراضات من جانبي قد تتفق مع رأيه. يعرض وايتهيد وجهة نظره عن الأنطولوجية العقلية كحل لـ«انقسام الطبيعة» إلى العالم اللاعقلي للفيزياء وعقل الوعي عالي المستوى. أما عن المستوى المنخفض للعقلية البدائية الذي يعزو إليه كل الأحداث، فيُقصد به سد هذه الفجوة الهائلة بين العالمين. لكن ألا يوجد انقسام مماثل بين العقلية البدائية للجسيمات الأولية والخبرة عالية المستوى للإنسان؟ وهل يوجد أي دليل مباشر على وجود العقلية البدائية منخفضة المستوى؟ وهل هناك شخص طالب بهذه العقلية فقط من أجل تأسيس استمرارية بين الكون المبكر والكون الحالي بما فيه من كائنات واعية؟ وإذا لم يكن هناك سبب بخلاف هذا، ألا يُعتبر المقطع «عقلي» في كلمة «عقلية بدائية» مجرد مراوغة، وألا تعتبر الفلسفة الكاملة للكائنات تلاعبًا لفظيًّا للعملية التي يحدث فيها تناول لإحدى المشكلات وإعادة تسميتها حلًّا؟ علاوةً على ذلك، ألا يكون تصور الأحداث الواقعية — على أنها الكيانات المادية النهائية للكون — نوعًا من مبدأ الذرية atomism، يُعد أكثر إفادةً بالتأكيد مما حدده ديموقريطس Democritus وجاسندي Gassendi، لكنه غير متطابق مع الطبيعة الكلية للعقل التي تكشف عنها خبراتنا عالية المستوى؟

في القسم التالي، أقترح أنه يمكن الرد على هذه الاعتراضات إلى حد ما من خلال ابتكار نسخة محدثة من منهج وايتهيد، باستخدام بعض المفاهيم المستمدة من ميكانيكا الكم[٩].

٤-٢: ارتباط الأفكار النظرية الكمية بالقضية العقلية-البدنية

إن أكثر مفاهيم نظرية الكم راديكاليةً يتمثل في أن الحالة الكاملة لأحد النظم — أي الحالة التي تحدد النظام إلى أقصى حد — لا تشتمل فقط على مجموعة الخصائص الفعلية للنظام، لكن لا بد أن تشتمل أيضًا على احتمالات أو خصائص كامنة، وفكرة الاحتمالات كامنة في مبدأ التراكب. إذا كانت قد حُددت الخاصية A لأحد النظم الكمية ومتجه الحالة ϕ (وافتُرض أن يكون لكل منهما وحدة معيارية)، حينئذٍ يمكن التعبير عن متجه الحالة بالصيغة: $\sum_i c_i u_i$، حيث u_i هو متجه الحالة للوحدة المعيارية الذي يمثل حالة يكون فيها لـ A قيمة محددة a_i، وكل c_i عبارة عن عدد مركب حيث مجموع $|c_i|^2$ يساوي الوحدة. وبالتالي، فإن ϕ يُعد تراكبًا لـ u_i بقيم مناسبة، وما لم يشتمل المجموع فقط على حد واحد، فإن قيمة A في الحالة التي يمثلها ϕ تكون غير محددة. وإذا فُسِّرَت الحالة الكمية واقعيًّا، كتمثيل للنظام كما هو وليس كخلاصة للمعلومات حوله، وإذا كان الوصف الكمي كاملًا وليس قابلًا لأية إضافات عن طريق «متغيرات خفية»، حينئذٍ يكون عدم التحديد هذا موضوعيًّا. علاوةً على ذلك، إذا كان النظام يتفاعل مع بيئته على نحو تصبح فيه A محددة، مثلًا بالقياس، إذن يتوقف الناتج على الاحتمالية الموضوعية، وتكون الاحتمالات $|c_i|^2$ للنواتج الممكنة المختلفة احتمالات موضوعية. وهذه السمات الخاصة بعدم التحديد الموضوعي والاحتمالية الموضوعية يمكن وصفها بدقة من خلال تمييز الحالة الكمية والتعامل معها على أنها شبكة من الاحتمالات.

يتمثل المفهوم الراديكالي الثاني لنظرية الكم في التشابك. فإن كانت u_i متجهات الحالة للوحدة المعيارية التي تمثل حالات النظام I، وكانت للخاصية A قيم محددة في هذه الحالات، وكانت v_i متجهات الحالة للنظام

II، وكانت للخاصية B قيم محددة فيها، إذن يوجد متجه حالة للنظام المركب I + II ‏$(X = \sum_i c_i u_i v_i)$، حيث $|c_i|^2$ يساوي الوحدة. كما أنه لا يكون النظام I أو النظام II، كلٌّ على حدة، في حالة كمية بحتة، وبصفةٍ خاصة لا يكون النظام I تراكبًا لـ u_i، ولا يكون النظام II تراكبًا لـ v_i، لأن مثل هذه التراكبات لا تشمل الأسلوب الذي يرتبط به u_i وv_i. وبالتالي، تصبح X نوعًا من حالة كلية، تُسمى «حالة تشابك». لذلك، فإن لدى نظرية الكم نظامَ تركيب لا يناظره أي نظام في الفيزياء الكلاسيكية. إذا حدثت عملية تتحقق A بمؤداها، على سبيل المثال، عن طريق اتخاذ القيمة a_i، إذن ستتحقق الخاصية B بصورة أوتوماتيكية أيضًا وستحصل على القيمة b_i. وهكذا، يستلزم التشابك أن تتحقق احتمالات I وII على نحو ترادفي.

تشمل النسخة المحدثة لمنهج وايتهيد التي أشرت إليها دون توضيحها في نهاية القسم (٤-١) مفهومي الاحتمالات والتشابك بطرق أساسية. فالاحتمالية هي الأداة التي يمكن من خلالها الربط بين العقلية البدائية المبهمة والوعي عالي المستوى. حتى بالنسبة لكائن حي معقد لديه مخ عالي التطور يمكن أن يصبح غير واعٍ. ولا يحتاج الانتقال بين الوعي واللاوعي أن يُفسر بوصفه تغيرًا في الوضع الأنطولوجي، لكن كتغير في الحالة، ويمكن للخصائص أن تتغير من كونها محددة إلى كونها غير محددة، والعكس صحيح. وفيما يتعلق بمنظومة بسيطة مثل الإلكترون، يجب ألا نتصورها أكثر من مجرد انتقال من حالة عدم تحديد مطلق للخبرة إلى عدم وضوح أقل. لكن عند نقطة تلاقي الحالتين، يظهر المفهوم الثاني — التشابك — فبالنسبة لمنظومة متعددة الأجسام في حالات تشابك، يوجد حيز واسع من الخصائص القابلة للملاحظة أكبر منه في المنظومات فردية الجسيمات، كما أن نطاق الملحوظات المجمَّعة يُعد أكثر اتساعًا بشكل عام من نطاق ملحوظات جسيمات العناصر. ومن المحتمل أن ينتج عن تشابك المنظومات الأولية، التي يشتمل كل منها على نطاق ضيق جدًّا من الخصائص العقلية، نطاق واسع من الحالات بدايةً من حالات اللاوعي ووصولًا إلى حالات الوعي بمستوياته العالية.

كيف يمكن مقارنة أفكار وايتهيد المحدثة بتطبيق روجر للأفكار الكمية على القضية العقلية-البدنية؟ في الفصل السابع من كتاب SM وفي الفصلين الثاني والثالث من هذا الكتاب، استفاد روجر بصفة أساسية من الفكرتين العظيمتين للاحتمالية والتشابك. فقد استخدم الاحتمالية في افتراضه أن «العمليات الحسابية الكمية» يُجرى تنفيذها من خلال منظومة من الخلايا العصبية، وكل فرع من تراكب ما يؤدي عملية حسابية مستقلة عن العمليات التي تُنفذ في الفروع الأخرى (كتاب SM صفحتا ٣٥٥-٣٥٦). واستُخدم التشابك (الذي يشير إليه روجر عادةً بالترابط) في مراحل متعددة من أجل تفسير أداء هذه العمليات الحسابية: من المفترض أن الأنيبيبات الدقيقة في جدران الخلية تؤدي وظيفة عضوية في آلية عمل الخلايا العصبية. ولهذا الغرض، افتُرض أن الأنيبيب الدقيق الواحد يكون في حالة تشابك (كتاب SM صفحتا ٣٦٤-٥)، وبعدها افتُرض أن الأنيبيبات الدقيقة لخلية عصبية مفردة تكون في حالة تشابك، وأخيرًا، هناك حالة تشابك مفترضة لعدد هائل من الخلايا العصبية. وفي الواقع، يحتاج الأمر إلى تشابك واسع النطاق لأن «وحدة العقل الفردي يمكن أن تبرز في هذا الوصف فقط إذا وُجد شكل ما من الترابط الكمي الممتد عبر جزء ملحوظ من المخ ككل.» (كتاب SM صفحة ٣٧٢) ويؤكد روجر أن اقتراحه هذا معقول إذا ما أُخذ في الاعتبار في ضوء ظاهرتي الموصلية الفائقة والميوعة الفائقة، خاصةً بالنسبة للتوصيل الفائق ذي درجة الحرارة العالية، وفي ضوء العمليات الحسابية لفروليش التي توضح أن التشابك واسع النطاق ممكن في المنظومات البيولوجية عند درجة حرارة الجسم (كتاب SM صفحتا ٣٦٧-٨). بالإضافة إلى كل ما سبق، هناك فكرة كمية أخرى في معالجة روجر للعقل لم يستقِها من نظرية الكم المعاصرة، لكن من نظرية الكم المستقبلية التي يتصورها، وهذه الفكرة سوق تُناقش في القسم (٤-٣). وفي الواقع، تتمثل هذه الفكرة في الاختزال الموضوعي لأحد التراكبات (الذي يُشار إليه اختصارًا بـ **OR**)، وهذا الاختزال الموضوعي يحدث من خلاله اختيار قيمة واقعية للحالة *A* القابلة للملاحظة من نطاق واسع مبدئيًّا من القيم الممكنة. وحقيقة أن

هذا الاختيار للقيم الواقعية لا غنى عنه لأية نظرية تخص العقل ترجع إلى الظاهرة غير القابلة للجدال المتعلقة بالأحاسيس والأفكار المحددة في خبرتنا الواعية. ويُعد اختيار القيم الواقعية أمرًا ضروريًّا أيضًا حتى إذا كان هناك شيء مثل الحساب الكمي، لأنه في نهاية المعالجة المتماثلة التي تحدث في الفروع المختلفة للتراكب يتعين التوصل إلى «نتيجة» محددة (كتاب SM صفحة ٣٥٦). في النهاية، فإن روجر يفترض أن **OR** سوف يدعم الجوانب غير الحسابية للنشاط العقلي.

من وجهة نظر المنهج المحدث لويتهيد، إن ما تفتقر إليه نظرية روجر عن العقل — سواء سهوًا أم عمدًا — هو فكرة العقلية باعتبارها شيئًا أساسيًّا في الكون من الناحية الأنطولوجية. ويبدو أن منهج روجر مماثل — على نحو غير موثوق فيه — للتفسير الكمي لمبدأ الفيزيائية. وفي تفسيرات مبدأ الفيزيائية المشار إليها في القسم (٤-١)، عولجت الخصائص العقلية كخصائص تركيبية لحالات مخية أو كبرامج لتنفيذ عمليات حسابية بواسطة مجموعات من الخلايا العصبية. وقد أضاف روجر مقومات جديدة لبرنامج تفسير العقلية فيزيائيًّا — هي الترابط الكمي على نطاق واسع والتعديل المفترض للديناميكيات الكمية — من أجل تفسير اختزال حالات التراكب، لكنّ هذا التعقيد لم يؤثر سلبًا على الجدالات البسيطة المناهضة للفيزيائية المعروضة في القسم (٤-١)، حيث أثر بالفعل على الجدالات القوية. ومن ثم فإن مظاهر حياتنا العقلية لا تظهر في أية أنطولوجية فيزيائية، والفيزيائية المحكومة بقواعد كمية لا تزال فيزيائية. على النقيض من ذلك، فإن فلسفة وايتهيد عن الكائنات الحية ليست فيزيائية بصورة جذرية، نظرًا لأنها تعزو الخصائص العقلية إلى الكيانات الأكثر بدائية في الكون، وبهذا تثري الوصف الفيزيائي لها نظريًّا. إن النسخة المحدثة لأفكار وايتهيد التي طرحتها للمناقشة بتردد لا تستخدم نظرية الكم كبديل عن الوضع الأنطولوجي الأساسي للعقلية، بل بوصفها أداة عقلية لتفسير نطاق مهول من التجليات العقلية في العالم، بدايةً من الانخفاض الكامل لمستوى العقلية الناشئة إلى تطورها عالي المستوى.

يمكن أن يُفسر الاختلاف بأسلوب آخر هذا توضيحه: تُعتبر نظرية الكم إطار عمل يستخدم مفاهيم مثل الحالة والملحوظات والتراكب واحتمالية الانتقال والتشابك. وقد طبق الفيزيائيون إطار العمل هذا بنجاح على أنطولوجيتين مختلفتين إحداهما عن الأخرى هما: أنطولوجيا الجسيمات، في ميكانيكا الكم القياسية اللانسبية للإلكترونات والذرات والجزيئات والبلورات، وأنطولوجيا المجالات، في الديناميكا الكهربية الكمية والكروموديناميكا chromodynamics الكمية والنظرية العامة للمجال الكمي. ونظريًّا، يمكن تطبيق نظرية الكم على أنطولوجيات متباينة تمامًا مثل أنطولوجيا العقول أو الأنطولوجيا المزدوجة أو أنطولوجيا الكيانات المتاحة من خلال العقلية البدائية. وقد أثمرت التطبيقات الفيزيائية المعتادة لنظرية الكم على نحو رائع في تفسير الظواهر الملحوظة للمنظومات المركبة، بما فيها من منظومات ماكروسكوبية، إذا ما استخدمنا المصطلحات الميكروفيزيائية. ويبدو لي أن روجر يحاول أن يفعل شيئًا مشابهًا، بشرح الظواهر العقلية في إحدى الأنطولوجيات الفيزيائية عن طريق التوظيف الفعّال للمفاهيم الكمية. أما أفكار وايتهيد المحدثة، على النقيض مما سبق، فإنها تطبق إطار عمل نظرية الكم على أنطولوجية عقلية من البداية. وباعتراف الجميع، تعد أفكار وايتهيد المحدثة بدائية ومعتمدة على الانطباعات بدلًا من اعتمادها على الحقائق أو المنطق وخالية من التنبؤات النظرية التامة والتأكيدات التجريبية التي يمكن أن ترسخ مصداقيتها كنظرية «واعدة». من ناحية أخرى، فإن لها قيمة كبيرة في الإقرار بعدم قابلية اشتقاق العقلية، الأمر الذي تفتقر إليه كل أنواع مبدأ الفيزيائية. في الواقع، ربما أكون قد أسأت فهم أو تفسير منطق روجر وقد يكون روجر نفسه من المدافعين عن أفكار وايتهيد أكثر مما تصورت، وسواءٌ أكان الأمر كذلك أم لا، فإن وضوحه في عرض الموضوع سوف يفسر موقفه إلى حدٍّ بعيد.

إذا أمكن لأية نسخة محدثة لمبدأ وايتهيد أو أية نظرية كمية عن العقل أن تحقق النضج والتوافق العلميين، إذن ستحظى الظواهر السيكولوجية باهتمام أكبر دون أدنى شك، حيث توجد بعض الظواهر التي تنطوي على

ملامح كمية، مثل عمليات الانتقال من الرؤية المحيطية إلى الرؤية البؤرية والانتقال من الوعي إلى اللاوعي وسيادة العقل والقصدية وصعوبة تحديد الأحداث العقلية زمنيًّا وعمليات الدمج والغموض في الرمزية الفرويدية. وقد ناقشت كتب عديدة مهمة عن العلاقة بين نظرية الكم والعقل الظواهر العقلية المشتملة على ملامح كمية، وخاصةً كتب لوكوود[١٠] وستاب[١١] Stapp. وقد ناقش روجر نفسه بعض هذه الظواهر، مثل تجارب كورنهابر وليبت حول تزامن جانبي الوعي السلبي والفعّال (كتاب SM الصفحات ٣٨٥-٣٨٧).

إن أي تطبيق جاد لنظرية الكم على العقل لا بد أن تضع في الاعتبار التركيب الحسابي لفضاء الحالات ومجموعة من الجوانب القابلة للملاحظة، لكنّ الإطار الكمي لا يوفر هذه المقومات. وبالنسبة لميكانيكا الكم القياسية اللانسبية ونظرية المجال الكمي، تحددت هذه التركيبات بطرق متعددة: بوضع تمثيل مجموعات الزمكان في الاعتبار، ومن خلال المنهج التجريبي المعتمد على الميكانيكا الكلاسيكية ونظرية المجال الكلاسيكية وبالطبع من خلال التجربة. وعام ١٩٢٦، قدم أحد أبحاث شرودنجر العظيمة حول الميكانيكا الموجية تناظرًا مثمرًا للغاية، وفيه تُعد علاقة البصريات الهندسية بالبصريات الموجية مماثلة لعلاقة ميكانيكا الجسيمات بالميكانيكا الموجية الافتراضية. لذا، أليس من المجدي تجريبيًّا أن نضع في الاعتبار تناظرًا جديدًا مفاده أن علاقة الفيزياء الكلاسيكية بفيزياء الكم تماثل علاقة علم النفس الكلاسيكي بعلم النفس الكمي الافتراضي؟ بطبيعة الحال، تتمثل إحدى صعوبات الاستفادة من هذا التناظر في أن تركيب «علم النفس الكلاسيكي» يُعد أقل شهرةً بكثير وربما أقل تحديدًا على نحو جوهري من تركيب الميكانيكا الكلاسيكية.

علاوةً على ما سبق، دعوني أقدم الآن اقتراحًا آخر، فمن المحتمل أنه يمكن تطبيق المفاهيم الكمية على علم النفس، لكن دون تضمين التركيب الهندسي بالدرجة نفسها عند تضمينه في فيزياء الكم. حتى في ظل وجود شيء مثل فضاء الحالات العقلية، هل نستطيع افتراض أن هذا الفضاء

سيكون له تركيب فضاء هيلبرت الإسقاطي؟ وبصفةٍ خاصة، هل سيوجد ناتج داخلي بين أية حالتين عقليتين يحدد احتمالية الانتقال من حالة إلى أخرى؟ أليس من الممكن أن يوجد تركيب أضعف في الطبيعة، مع كونه من النوع الكمي؟ هناك أبحاث بالغة الإثارة قدمها ميلنيك(١٢) Mielnik تقترح أن أي مفهوم كمي بسيط هو القدرة عن التعبير عن حالة «مختلطة» بأكثر من طريقة باعتبارها اتحادًا لحالات مجردة، بينما في الميكانيكا الإحصائية الكلاسيكية يمكن التعبير عن حالة مختلطة بطريقة واحدة فقط تتعلق بالحالات المجردة. وهناك افتراض يقول إنه يمكن ابتكار فينومينولوجيا للألوان (أو علم ظواهر خاص بالألوان) كتوضيح لفكرة ميلنيك، مثل الطرق العديدة المتباينة المُستخدمة لتكوين لون أبيض من خليط من الضوء الملون.

٤-٣: مشكلة تحقيق الاحتمالات

في الفصل الثاني، صنَّف روجر مشكلة تحقيق الاحتمالات (تُسمى أيضًا مشكلة اختزال الحزمة الموجية، ومشكلة القياس) باعتبارها اللغز X، وهي مشكلة لا يمكن إيجاد حل لها دون تغيير جذري في النظرية نفسها، وليست مشكلة يمكن التخلص منها عن طريق الاعتياد، وأنا أوافق على ذلك تمامًا. إذا كانت نظرية الكم تصف موضوعيًّا منظومة فيزيائية، إذن ثمة جوانب للمنظومة قابلة للملاحظة تعتبر غير محددة موضوعيًّا في حالة معينة، لكنها تصبح محددة عند إجراء قياس. هذا، ولكن الديناميكا الخطية لنظرية الكم تجعل من المستحيل تحقيق الاحتمالات عن طريق القياس، إذ إن الخطية يترتب عليها أن تكون الحالة النهائية للمنظومة المركبة — الخاصة بأداة القياس والشيء الخاضع للقياس — تراكبًا للحدود، وفيه يتخذ مؤشر الملاحظة في أداة القياس قيمًا مختلفة. وأنا أشارك روجر في شكوكه حول كل المحاولات الرامية إلى تفسير هذا اللغز، على سبيل المثال، من خلال تفسيرات العوالم المتعددة وعدم الترابط والمتغيرات الخفية ... إلخ. وفي مرحلة أو أخرى لعملية قياس، يتوقف التطور الوحدوي للحالة الكمية وتتحقق الاحتمالات. لكن في أية مرحلة يحدث ذلك؟ ثمة احتمالات عديدة:

ربما تكون المرحلة فيزيائية، وقد تحدث عندما تتشابك منظومة ماكروسكوبية مع جسم ميكروسكوبي، أو عندما يتشابك القياس المتري للزمكان مع منظومة مادية. وقد تكون المرحلة عقلية، تحدث في عقل/نفس الملاحظ، ويفترض روجر أن تحقيق الاحتمالات عملية فيزيائية بسبب عدم استقرار تراكب حالتين أو أكثر للقياس المتري الزمكاني؛ وكلما زاد فرق الطاقة بين الحالات المتراكبة قصُرت فترة عمر التراكب (كتاب SM الصفحات ٣٣٩-٤٦). ومع ذلك فإن الربط بين هذا الاستنتاج وإصرار روجر على تفسير الخبرات الواقعية في الوعي يفرض بعض القيود المعوقة. فهو يحتاج إلى أن يفسر تراكب الحالات المخية — كما سبق وأوضحنا شمولية المخ — لكن الحالات الشاذة، مثل تراكب رؤية وميض أحمر ورؤية وميض أخضر معًا، لا بد ألا تحدث على الإطلاق أو تكون عابرة حتى يتعذر اصطدامها فجأة بالوعي. ويجادل روجر — على سبيل التجربة وبصورة سطحية — أن فروق الطاقة في الحالات المخية المطابقة لهذه الإدراكات المختلفة كبيرة بما يكفي لتسفر عن فترة عمر قصيرة للتراكب. ومع ذلك فهو يقر في مواضع كثيرة (كتاب SM الصفحات ٤٠٩، ٤١٠، ٤١٩، ٣٤٢-٣٤٣) أنه يحاول التقدم بخطوات محدودة، لأنه يتعين عليه الالتزام بالترابط قدر المستطاع لتفسير شمولية العقل، والتخلي عنه بما يكفي لتفسير أحداث الوعي المحددة. أمّا عن الطريقة — التي يمكن أن يصبح بها المخ أو العقل الذي يعمل طبقًا للأسلوب الذي أوضحه روجر فعّالًا في الأمور الحياتية — فيكتنفها الغموض بصورة كبيرة للغاية.

الجدير بالذكر أن روجر وجماعة الباحثين لم يتوصلوا حتى الآن بصورة كاملة إلى مصادر مجموعة التعديلات المفترض إجراؤها على ميكانيكا الكم بغرض التفسير الموضوعي لتحقيق الاحتمالات. وسوف أذكر باختصار منهجين أجد أنهما سيفيدانا في هذا الصدد؛ أولهما أن روجر ذكر نموذج الاختزال التلقائي لـ جيراردي Ghirardi وريميني Rimini وويبر Weber وآخرين، وانتقده بشدة (كتاب SM صفحة ٣٤٤)، لكنّ ثمة أنواعًا لهذه الديناميكا لم تتعرض لهذه الانتقادات. والمنهج الثاني، الذي لم يذكره،

يتمثل في احتمالية تطبيق «قاعدة الاختيار الفائق» في الطبيعة، الأمر الذي يحول دون حدوث تراكب بين أيسومرات[٤] isomers أو هيئات الجزيئات الماكروسكوبية. والحافز وراء التوصل لهذا الاستنتاج هو اعتبار أن الجزيئات الماكروسكوبية تعمل على نحو نموذجي وكأنها مفاتيح في الخلية، تتيح أو تمنع تنفيذ العمليات طبقًا لهيئة الجزيء. وفي حالة تراكب هيئتين مختلفتين، يصبح لأحدهما نظير خلوي لقطة شرودنجر، أي عملية بينية بين الحدوث وعدم الحدوث. وإذا كانت الطبيعة تذعن لقاعدة اختيار فائق تمنع هذه التراكبات، فسيمكن تجنب حدوث ارتباك، لكن سيبقى السبب لغزًا: لماذا تحول الطبيعة دون حدوث تراكبات لحالات هيئات خاصة بجزيئات مركبة، وتسمح بحدوثها في حالة الجزيئات البسيطة؟ وأين الحد الفاصل بين هذين السلوكين؟ مع ذلك فإن هذا الاختيار الفائق قد يفسر كل حالات تحقيق الاحتمالات التي نملك أدلة قوية عليها، وقد يكون أيضًا لديه خاصية قيّمة تتمثل في كونه قابلًا للاختبار من خلال التحليل الطيفي spectroscopy للجزيئات(١٣).

أخيرًا، أرى أنه يجدر بنا ملاحظة أنه من وجهة نظر وايتهيد، لا يتسم الافتراض، الذي يقول إن تحقيق الاحتمالات يحدث من خلال عقل/نفس المدرِك، بهذه الدرجة من التفاهة والتمركز حول الإنسان والغموض والبُعد عن الأساليب العلمية، كما يُشاع عنه. وطبقًا لوايتهيد، فإن العقلية شائعة في الطبيعة، لكنّ العقلية عالية المستوى تعتمد على تطور مجموعة من الأحداث المركبة ذات الطبيعة الخاصة. بالإضافة إلى ذلك، فإن قدرة أية منظومة على تحقيق الاحتمالات، وبالتالي تعديل الديناميكا الخطية لميكانيكا الكم، قد تكون شائعة أيضًا في الطبيعة، لكنها لا يمكن إهمالها فقط في المنظومات ذات العقلية عالية المستوى. وسوف أؤكد على هذا التعبير — مع هذا — بالقول إن إرجاع قوة التراكبات المختزلة إلى العقل/النفس أمرٌ لا بد من التعامل معه على نحو جدي، فقط إذا أمكن فهم ما ينطوي عليه

---

[٤] أيسومرات: مركبات لها صيغة جزيئية موحدة، ولكنها تختلف في الخصائص الكيميائية — يُطلق عليها أيضًا مجانسات.

من حقائق ضمنية بالنسبة لنطاق واسع من الظواهر السيكولوجية بدقة، وحينئذ فقط ستكون ثمة احتمالية لإخضاع الافتراض للاختبار التجريبي المحكم.

Notes

(1) 'We have to know, so we will know'. This exhortation is engraved on Hilbert's gravestone. See Constance Reid (1970). *Hilbert*, p. 220. (New York: Springer-Verlag).

(2) Hilary Putnam (1994) Review of *Shadows of the Mind, The New York Times Book Review*, Nov. 20 1994, p. 1.

(3) Roger Penrose (1994) Letter to *The New York Times Book Review*, Dec. 18 1994, p. 39.

(4) Ned Block (1980) *Readings in Philosophy of Psychology*, Volume 1, Parts 2 and 3. (Harvard University Press, Cambridge, MA).

(5) Alfred North Whitehead (1933) *Adventures of Ideas*, (Macmillan, London) (1929) *Process of Reality* (Macmillan, London).

(6) A. N. Whitehead, *Adventures of Ideas*, Chapter 11, Section 17.

(7) Ibid., Chapter 13, Section 6.

(8) Roger Penrose (1989) *The Emperor's New Mind*. (Oxford University Press, Oxford).

(9) Abner Shimony (1965) 'Quantum physics and the philosophy of Whitehead', in Max Black (ed.), *Philosophy in America* (George Allen & Unwin, London): reprinted in A. Shimony (1993). *Search for a Naturalistic World View*, Volume 2, pp. 291-309. (Cambridge University Press, Cambridge); Shimon Malin, (1988). A Whiteheadian approach to Bell's correlations, *Foundations of Physics*, **18**, 1035.

(10) M. Lockwood (1989) *Mind, Brain and the Quantum*, (Blackwell, Oxford).

(11) Henry P. Stapp (1993) *Mind, Matter and Quantum Mechanics* (Springer-Verlag, Berlin).

(12) Bogdan Mielnik (1974) Generalized quantum mechanics, *Communications in Mathematical Physics*, **37**, 221.

(13) Martin Quack (1989) Structure and dynamics of chiral molecules, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **28**, 571.

الفصل الخامس

لماذا الفيزياء؟

نانسي كارترايت

لقد ناقشنا كتاب روجر بنروز Shadows of the Mind في سلسلة ندوات مشتركة بين إل إس إي كولدج وكينجز كولدج تحت عنوان :Philosophy Science or Theology. وأريد أن أبدأ بطرح السؤال نفسه الذي طرحه عليّ أحد المشاركين في الندوة، ألا وهو: «ما الأسباب التي دفعت روجر للتفكير في أن الإجابات عن الأسئلة المطروحة حول العقل والوعي توجد في الفيزياء وليس في البيولوجيا؟» وبقدر ما أستطيع أن أرى، توجد ثلاثة أنواع من الأسباب التي يقترحها روجر:

(١) يمكننا أن نقدم برنامجًا واعدًا جدًّا فيما يخص السبب الأول، ومن المحتمل أن يكون هذا السبب هو أقوى الأسباب التي يمكننا اقتراحها لمشروع كمشروع روجر. وفي الواقع، لكوني من أنصار الوضعية، وتعارضت أفكاري في وقت واحد مع الميتافيزيقا واستدلال ما وراء نطاق الخبرة[١] transcendental argument، يتعين أن أكون متأهبة لأعرض أن هذا هو النوع الوحيد من الجدال الذي ينبغي أن ينال اهتمامًا أكبر. وبالطبع، تعتمد مدى قوة هذا الجدال في دعم مشروع على مدى فاعلية البرنامج، ومدى ما

[١] مفهوم فلسفي يهتم بالقاعدة المعرفية القبلية أو الحدسية بصورة مستقلة عن الخبرة أو التجربة الإنسانية.

يحتويه من تفاصيل. ومن الواضح أن برنامج روجر — المتمثل أولًا في افتراض وجود ترابط كمي ماكروسكوبي عبر الأنيبيبات الدقيقة في الهيكل الخلوي، ثم البحث عن سمات الوعي غير الحسابية الخاصة في نوع جديد من التفاعل الكمي الكلاسيكي — ليس برنامجًا مفصلًا. والمستقبل الواعد للبرنامج لا يكمن بالتأكيد في حقيقة أنه خطوة طبيعية مستقبلية في أجندة أعمال بحثية متطورة ومثبتة. وإذا اعتُبر واعدًا، فلا بد أن يكون ذلك بسبب جسارة الأفكار وإبداعها، وبسبب الاقتناع بأنه من الضروري حدوث تفاعل جديد من هذا النوع بأية طريقة ممكنة لاستبعاد ميكانيكا الكم، علاوةً على الالتزام القوي المسبق بأنه في حالة وجود تفسير علمي للوعي، فلا بد في النهاية أن يكون تفسيرًا فيزيائيًّا. وأنا أعتقد أن هذا السبب الأخير لا بد بالتأكيد من أن يكون له دور رئيسي إذا كنا سنحكم على برنامج روجر بأنه واعد. لكن طبقًا لمدى تأثير هذا الدور، من الواضح أن حقيقة أننا نحكم على البرنامج بأنه واعد لا تستطيع أن تبرر لنا مجرد التفكير في أن الفيزياء — وليس أي علم آخر — هي التي ستؤدي هذه المهمة.

(٢) يتمثل السبب الثاني للتفكير في أن الفيزياء بمفردها ستوفر التفسير النهائي للعقل في الحقيقة التي لا يكتنفها أي شك التي تقول إن فروعًا من علم الفيزياء — خاصةً الكهرومغناطيسية — تُسهم في فهمنا للمخ والجهاز العصبي. فالآن مثلًا، نصف نقل الرسائل بطريقة قياسية باستخدام مفاهيم نظم الدوائر الكهربية. ويعتمد جزء من منهج روجر على إسهامات حديثة من الكهرومغناطيسية؛ إذ من المفترض أن تكون الحالات المختلفة للاستقطاب الكهربي في أحد دايمرات الأنيبيبات هي الأساس للتباينات في التشكيل الهندسي التي تؤدي إلى انثناء الدايمرات بزوايا مختلفة مع الأنيبيب الدقيق. لكن هذا النوع من الجدال لن يجدي نفعًا، حيث إن حقيقة أن الفيزياء تقدم جزءًا من تفسير العقل سببٌ ضعيف لاستنتاج أنها لا بد أن تقدم التفسير بأكمله.

أحيانًا يُشار إلى أن الكيمياء في هذه المرحلة تثبت عكس هذا الجدال، والآن بالطبع لا ينكر أحد أن جزءًا صغيرًا من التفسير تقدمه الكيمياء. من

ناحية أخرى، فإنه يُفترض أن فروع الكيمياء ذات الصلة التي يمكنها فعل ذلك هي فروع الفيزياء نفسها. وهذا إلى حد بعيد هو الأسلوب الذي تحدث به روجر عن هذا الأمر: «إن القوى الكيميائية التي تتحكم في تفاعل الذرات والجزيئات هي في الواقع قوى ميكانيكية كمية، كما أن النشاط الكيميائي بصفةٍ عامة هو الذي يتحكم في سلوك عناصر الناقلات العصبية التي تنقل الإشارات من خلية عصبية إلى أخرى، عبر فجوات دقيقة تُسمى شقوق التشابك synaptic clefts. إلى جانب أن جهود الفعل التي تتحكم فيزيائيًّا في نقل الإشارات العصبية نفسها لها أصل ميكانيكي كمي لا يمكن إنكاره.» (كتاب SM صفحة ٣٤٨) وبذلك تدخلت الكيمياء للدفاع عن الفيزياء ردًّا على قلقي المُثار حول القفزة الاستدلالية الهائلة من «الدور الجزئي» للفيزياء إلى «الدور الكلي». والآن ظهرت هذه القفزة الاستدلالية مرةً أخرى في كل المجالات، ولكن ليس بالدرجة نفسها. ومن المشهور أنه ليس لدينا شيء مثل اختزال حقيقي للفروع ذات الصلة الخاصة بالكيمياء الفيزيائية إلى الفيزياء — سواءٌ أكانت الفيزياء الكمية أم الكلاسيكية[1] — حيث إن ميكانيكا الكم لها أهميتها في تفسير جوانب من الظواهر الكيميائية، لكن دائمًا ما تُستخدم المفاهيم الكمية بمحاذاة المفاهيم الفريدة من نوعها — أي غير المختزلة — من المجالات الأخرى، وهذه المفاهيم لا تفسر الظواهر بمفردها.

(٣) يُعد السبب الثالث للتفكير في أن الفيزياء ستفسر العقل ميتافيزيقيًّا، ومن الجلي للغاية تسلسل الترابط الذي يستخدمه روجر. ويتعين علينا على الأرجح أن نفترض أن وظيفة العقل ليست غامضة، وذلك يعني أنه يمكن تفسيرها بمصطلحات علمية، بما يعني أنه يمكن تفسيرها في إطار الفيزياء. وفي الندوة التي شاركت فيها، طرح جيمس دوربين James Durbin — عالم الإحصاء الشهير — السؤال الآتي: «لماذا لا تُستخدم البيولوجيا في تفسير العقل؟» وفي الواقع، أعتقد أن هذا السؤال ذو صلة بمحور حديثنا. وبوصفه عالم إحصاء، فقد عاش دوربين في عالم اختلطت فيه المفاهيم، فقد درس أنماطًا لخصائص تنتمي لأنواع المجالات كافة، سواء أكانت العلمية أم العملية. وفي المقابل، فإن عالم روجر هو عالم المنظومة الموحدة، التي تُعتبر

الفيزياء فيها أساس التوحيد، وأعتقد أن السبب وراء هذا النوع من النزعة الفيزيائية هو فكرة أنه ليس لدينا ميتافيزيقا مقنعة. وبدون المنظومة، لا يتبقى لدينا سوى ازدواجية غير مقبولة، أو طبقًا لتعبير روجر ازدواجية غامضة. وهذا هو الموضوع الذي أريد مناقشته[٢]، لأنني أعتقد أن وجهة النظر القائلة إنه لا يوجد بديل مادي تستحوذ حقيقةً على تفكير كثير من الفيزيائيين. وثمة شعور بأن كل من يتعامل مع الفيزياء بجدية باعتبارها وصفًا حقيقيًّا للعالم سوف يضطر للاعتقاد في سيادتها.

ولكن لماذا؟ من الواضح أن هناك عددًا كبيرًا جدًّا من الخصائص المختلفة التي لها تأثير كبير على العالم، والتي دُرس بعضها من خلال أحد المناهج العلمية وبعضها من خلال منهج آخر، ويوجد بعض منها في نقطة تقاطع علوم مختلفة، وأغلبها لا يدرسها أي علم على الإطلاق. ما الذي يبرر وجهة النظر القائلة إن المناهج العلمية كافة لا فرق بينها إطلاقًا إذا ما نظرنا إليها نظرةً غير سطحية؟ أعتقد أنه يوجد أمران: أحدهما هو الثقة المفرطة في انتظام تفاعلاتها، والآخر التقدير الزائد لما أنجزته الفيزياء.

ويجدر بي مع هذا ملاحظة أن هذه المحدودية في الرؤية الميتافيزيقية التي لا ترى سوى نوع واحد من الأحادية الفيزيائية منتشرة انتشارًا واسعًا في الفيزياء، حتى بين الذين يعارضون اختزال العلوم الخاصة إلى الفيزياء. بالإضافة إلى ذلك، فإن هناك أيضًا فلسفة البيولوجيا التي ظلت النزعة الاختزالية مختفية فيها لفترة طويلة وعادت الآن مرةً أخرى لتؤخذ بجدية بعين الاعتبار بوصفها نتيجة طبيعية ومنطقية لما سبقها، في ظل خصائص وقوانين نشأت مع زيادة مستويات التعقيد والتنظيم. ومع ذلك فإن الأغلبية لا يستطيعون التحرر من الأحادية؛ فهم يشعرون أنهم مضطرون للإصرار على «التبعية». وعلى نحو تقريبي، إذا قلنا إن خصائص البيولوجيا تتبع خصائص الفيزياء، يعني ذلك أننا نقول إنه لو كان لدينا موقفان متماثلان في خصائصهما الفيزيائية، فلا بد أن يكونا متماثلين في خصائصهما البيولوجية. ولكنّ هذا لا يعني أن القوانين البيولوجية — طبقًا لهم — تُختزل إلى قوانين فيزيائية نظرًا لأن الخصائص البيولوجية لا تحتاج

إلى أن تُعرّف بمصطلحات فيزيائية. لكنّ ذلك أيضًا لا يعني أن الخصائص البيولوجية ليست خصائص مستقلة بذاتها، لأن الخصائص الفيزيائية تحددها. وبمجرد تحديد الوصف الفيزيائي، فإن الوصف البيولوجي لا يمكن أن يكون إلا على ما هو عليه؛ مما يشير إلى أن الخصائص البيولوجية لا تُعتبر مستقلة استقلالًا تامًّا.

إن التعامل مع الخصائص البيولوجية باعتبارها خصائص مستقلة تتمتع بالتأثير السببي بمفردها، أمرٌ لا يجدي نفعًا في حالة معارضة الأدلة التجريبية. فأنا أسلّم بصحة ما نراه في العلم: أحيانًا تساعد الفيزياء في توضيح ما يحدث في المنظومات البيولوجية، لكن كما سبق وقلت عن الكيمياء، فالأمر نفسه ينطبق هنا، حيث نادرًا ما يحدث ذلك دون مساعدة الوصف البيولوجي الفريد من نوعه غير المختزل. وفي سياق حديثنا هذا، نستطيع تطبيق شعار كنت قد استخدمته بطريقة مختلفة في مجال آخر، وهذا الشعار هو: «لا للتفسير البيولوجي».[٢] وما نراه في الواقع يُوصف غالبًا بصورة طبيعية باعتباره تفاعلًا بين السمات البيولوجية والفيزيائية، وكل منهما يؤثر على الآخر. كما أن لدينا تعريفات للوصف الفيزيائي

[٢] أثناء المناقشة، أبدى أبنر شيموني الملاحظات التالية فيما يتعلق بهذا الموضوع:
«عرضت نانسي كارترايت أفكارها الخاصة بالعقل في سياق البيولوجيا بدلًا من الفيزياء، وبناءً عليه أحبذ الجزء الإيجابي من طلبها الذي تسعى إلى توضيحه. ومما لا شك فيه أن هناك الكثير من المعلومات اللازم تعلمها عن العقل من بيولوجيا التطور وعلم التشريح وعلم النفس العصبي والبيولوجيا التطورية ... إلخ، لكنني لا أوافق على أن دراسة علاقة العقل بالفيزياء غير مثمرة. فالعلاقات بين النظم يتعين معرفتها جيدًا قدر الإمكان؛ كذلك العلاقات بين النظم الكلية والأجزاء. ومما لا شك فيه أننا لا نستطيع مسبقًا معرفة إلى أين ستقودنا هذه الدراسات، وفي مجالات متباينة تأتي النتائج بالغة الاختلاف. وهكذا أوضحت لنا فرضية بل Bell والتجارب التي أدت إليها أن العلاقات المتبادلة الواضحة من خلال منظومات متشابكة بينها مسافات مكانية هائلة لا يمكن تفسيرها بواسطة أية نظرية تعزو حالات محددة إلى منظومة فردية، وهو انتصار عظيم للاتجاه الكلي. ويوضح البرهان الذي قدمه أونساجر Onsager، والذي ينص على أن نموذج أيسينج Ising ثنائي الأبعاد يخضع لتحولات مرحلية، أن الترتيب بعيد المدى يمكن أن يظهر في منظومة لانهائية تتفاعل فيها المركّبات فقط مع أقرب العناصر، وهو انتصار لوجهة النظر التحليلية ولمبدأ اختزال الماكروفيزياء إلى الميكروفيزياء. ويكشف هذان الرأيان — الكلي والتحليلي — عن شيء مهم بخصوص العالم. وفي حقيقة الأمر، فإن دراسة العلاقات بين النظم لا ينتهك صحة القوانين الفينومينولوجية داخل هذه النظم. وقد تقدم مثل هذه الدراسات منهجًا تجريبيًّا للقوانين الفينومينولوجية المهمة، كما قد تعرض فهمًا متعمقًا لهذه القوانين. عندما اقترح باستير Pasteur أن الكايرالية chirality الخاصة بالجزيئات هي المسئولة عن دوران مستوى الاستقطاب للضوء المار خلال المحاليل، اكتشف الكيمياء الفراغية stereo-chemistry.»

والوصف البيولوجي مرتبطة ارتباطًا وثيقًا بالمجالين، كل على حدة، فضلًا عن وجود قدر هائل من التعاون السببي بينهما؛ إذ تعمل الخصائص البيولوجية والفيزيائية معًا لتسفر عن تأثيرات لا تستطيع أي منهما أن تؤثر سببيًّا بمفردها. والانتقال من ذلك إلى وجهة النظر القائلة إن «الفيزياء لها التأثير الكامل» يمثل القفزة الاستدلالية الهائلة التي أثارت قلقي من قبل. فما نراه قد يكون متوافقًا مع الفيزياء، لكنه بالتأكيد لن يفضي إلى تلك النتيجة، ويبدو ظاهريًّا وكأنه يشير إلى اتجاه آخر بعيد عنها[٣].

يرجع جزء من سبب الاعتقاد في أن الفيزياء هي المسئولة عن تفسير العقل البشري — حسب اعتقادي — إلى إحدى وجهات النظر حول الانغلاق؛ من المفترض أن تكوّن مفاهيم أية نظرية فيزيائية جيدة وقوانينها منظومة منغلقة على نفسها. وهذا هو كل ما نحتاج إليه لنصبح قادرين على التنبؤ بهذه المفاهيم، ولكنني أعتقد أن وجهة النظر هذه المتعلقة بنجاح الفيزياء خاطئة، أو على الأقل تفاؤلية دون أدنى مبرر. وتقريبًا في الوقت الذي أصبحت فيه فكرة التبعية بارزة في الفلسفة، فإن الأمر نفسه انطبق على فكرة العلوم الخاصة. وبصفةٍ أساسية، فإن كل العلوم ما عدا الفيزياء تُعد علومًا خاصة، وذلك يعني أن قوانينها تظل صحيحة فقط في أفضل الأحوال في ظل عدم تغيير أي من العوامل الأخرى، وتظل كذلك لفترة طويلة فقط ما دامت لا تتدخل العوامل الخارجة عن نطاق النظرية قيد البحث.

لكن ما الذي يولد الثقة في أن قوانين الفيزياء تُعد أكثر من مجرد قوانين تظل كل العوامل الأخرى المتعلقة بها ثابتة دون تغيير؟ لا توضح نجاحاتنا العملية المذهلة ولا النجاح النيوتني المتعلق بنظام الكواكب الذي أثر كثيرًا في كانط Kant شيئًا من هذا القبيل. بالإضافة إلى ذلك، لا توضح الإسهامات التقنية العظيمة من مجال الفيزياء — مثل الصمامات المفرغة أو الترانزستورات أو مقاييس شدة المجال المغناطيسي SQUID — مثل هذا الأمر. وذلك، لأن هذه الأدوات اختُرعت للتأكد من عدم حدوث تدخل،

فهي لا تختبر هل القوانين لا تزال جيدة عندما يكون لبعض العوامل من خارج نطاق النظرية دور. وهناك أيضًا بالطبع الاعتقاد العام — في الفيزياء — بأنه لا يستطيع أن يتدخل أي شيء ما عدا العوامل نفسها التي يمكن وصفها بلغة الفيزياء والتي تخضع لقوانينها، لكن ذلك بالطبع هو مثار الجدل.

في النهاية، أريد أن أختتم حديثي بملاحظة حول المذهب الواقعي، وهنا أشير إلى نوع من وجهات النظر التعددية حول كل العلوم التي تقف جنبًا إلى جنب على قدم المساواة تقريبًا مع أنواع مختلفة متعددة من التفاعلات بين العوامل المدروسة في مجالات العلوم المختلفة. وهذه وجهة نظر تتوافق غالبًا مع رأي يقول إن العلم بنية إنسانية لا تعكس الطبيعة، لكن هذه العلاقة ليست ضرورية. فقد كان لكانط موقف معاكس تمامًا، ويرجع ذلك بدقة إلى أننا ننشئ العلم الذي يكون فيه النظام الموحد ليس ممكنًا فقط، بل ضروريًّا. ومع ذلك، ففي هذه الأيام غالبًا ما تصاحب وجهة النظر التعددية بنائية constructionism اجتماعية. لذلك من المهم التأكيد على أن التعددية لا تدل ضمنًا على أنها ضد المذهب الواقعي. فمجرد القول إن قوانين الفيزياء تُعتبر صحيحة في ظل ثبات كل العوامل الأخرى لا يُعتبر إنكارًا لكونها صحيحة، فهي فقط ليست مهيمنة بالكامل. وفي حقيقة الأمر، ليست الواقعية المتعلقة بالفيزياء هي التي تُعتبر عرضة للخطر في ظل التعددية، بل بالأحرى الإمبريالية. لذلك لا أريد أن ندخل في نقاش حول الواقعية العلمية، وبدلًا من ذلك أريد من روجر أن يناقش حجته الميتافيزيقية بأنه لا بد من أن تؤدي الفيزياء هذه المهمة؛ لأن هذه الحجة من الضروري أن يُسلم بها جدلًا إذا دار النقاش بالفعل حول ما إذا كان هذا هو نوع الفيزياء المفترض أداؤه المهمة أم ذاك. وفي الواقع إن القضية ليست متعلقة بما إذا كانت قوانين الفيزياء صحيحة ولها القدرة على التعامل بطريقة أو أخرى مع العقل، بل متعلقة بما إذا كانت القوانين جميعها صحيحة أو يتعين أن تقوم بالجزء الأكبر من مهمة التفسير.

Notes

(1) See R. F. Hendry: Approximations in quantum chemistry in Niall Shanks (ed.), *Idealisation in Contemporary Physics*, (Poznań Studies in the Philosophy of the Sciences and Humanities, Rodopi, Amsterdam) (forthcoming 1997). R.G. Woolley (1976): 'Quantum theory and molecular structure', *Advances in Physics*, **25**, 27-52.

(2) For details of arguments against the single system, see John Dopre (1993) *The Disorder of Things: Metaphysical Foundations of Disunity of Science* (Harvard University Press, Cambridge MA); Otto Neurath (1987) *Unified Science*, Vienna Circle Monograph Series, trans. H. Kael (D. Reidel: Dordrecht).

(3) For a further discussion of this point, see Nancy Cartwright (1993) Is natural science natural enough? A reply to Phillip Allport, *Synthese*, **94**, 291. For a more elaborated discussion of the general point of view mooted here, see Nancy Cartwright (1994) 'Fundamentalism vs the patchwork of laws', *Proceedings of the Aristotelian Society* and (1995) 'Where in the world is the quantum measurement problem', *Physik, Philosophie und die Einheit der Wissenschaft, Philosophia Naturalis*, ed. L. Kreuger and B. Falkenburg (Spektrum: Heidelberg).

الفصل السادس

اعتراضات صريحة لعالم اختزال جريء

ستيفن هوكنج

في البداية، ينبغي أن أعترف بأنني عالم اختزال له آراء جريئة، وإن اختلفت عما هو تقليدي. فأنا أعتقد أن قوانين البيولوجيا يمكن اختزالها إلى قوانين الكيمياء — وقد رأينا هذا يحدث فعليًّا مع اكتشاف تركيب الدي إن إيه — كما أعتقد أن قوانين الكيمياء يمكن اختزالها إلى قوانين الفيزياء، وفي رأيي فإن معظم الكيميائيين يوافقونني على هذا الرأي.

لقد تعاونت مع روجر بنروز على وضع أسس التركيب واسع النطاق للزمكان، بما فيه من مفرديات وثقوب سوداء. وفي الواقع توافقت آراؤنا إلى حد بعيد حول النظرية الكلاسيكية للنسبية العامة، لكن بدأت الخلافات تظهر عند معالجتنا للجاذبية الكمية. والآن، أصبح لنا منهجان شديدا الاختلاف بعضهما عن بعض فيما يخص العالم الفيزيائي والعقلي. وبصورة أساسية، يُعتبر بنروز من أتباع الفلسفة الأفلاطونية، حيث يؤمن بوجود عالم فريد من الأفكار بوسعه وصف حقيقة فيزيائية فريدة. أمّا عني أنا — من ناحية أخرى — فإنني من أتباع الفلسفة الوضعية، حيث أعتقد أن النظريات الفيزيائية هي مجرد نماذج رياضية نضعها، وأن التساؤل عما إذا كانت هذه النظريات تتوافق مع الواقع أم لا يُعد بلا معنى، فقط إذا تنبأت بالملاحظات.

أدى هذا الاختلاف المنهجي بروجر إلى طرح ثلاثة حجج في الفصول من الأول للثالث أعارضها بشدة؛ تتمثل أولاها في أن الجاذبية الكمية تتسبب فيما يسميه **OR** أو الاختزال الموضوعي للدالة الموجية. والحجة الثانية أن لهذه العملية دورًا مهمًّا في عمل المخ يحدث عن طريق تأثيرها في التدفقات المترابطة خلال الأنيبيبات الدقيقة، والثالثة أن ثمة حاجةً لإجراء مثل الاختزال الموضوعي لشرح الوعي الذاتي كنتيجةٍ لفرضية جودل.

ولتكن البداية من ضمن هؤلاء بالجاذبية الكمية، التي لديّ من المعرفة بشأنها الكثير. وفي هذا الصدد، يُعد الاختزال الموضوعي للدالة الموجية الذي قدمه روجر شكلًا من أشكال عدم الترابط. ويمكن حدوث عدم الترابط من خلال التفاعلات مع البيئة أو التقلبات التي تحدث في طوبولوجيا topology الزمكان، لكن يبدو أن روجر لا يريد أيًّا من هاتين الطريقتين. وبدلًا من ذلك، يزعم أن عدم الترابط يحدث بسبب الانحناء الطفيف في الزمكان الناجم عن كتلة جسم صغير. لكن طبقًا للأفكار المتفق عليها، لن يحول هذا الانحناء دون حدوث تطور هاميلتوني Hamiltonian evolution إن لم يكن في ظل عدم الترابط أو في ظل وجود اختزال موضوعي. في الواقع، ربما تكون الأفكار المتفق عليها خاطئة، لكن روجر لم يقدم لنا نظرية مفصلة نستطيع من خلالها تقدير متى يحدث الاختزال الموضوعي.

يبدو أن الحافز وراء تقديم روجر للاختزال الموضوعي يكمن في إنقاذ قطة شرودنجر البائسة من حالتها نصف الحية ونصف الميتة. وبالتأكيد في أيامنا هذه في ظل الدعوة لتحرير الحيوان، لن يجرؤ أحد على اقتراح تجربة كهذه، حتى وإن كانت فكرية. ومع ذلك فقد زعم روجر أن الاختزال الموضوعي كان ضعيف التأثير للغاية، لدرجة أنه لم يكن من الممكن تمييزه تجريبيًّا عن عدم الترابط الناجم من التفاعل مع البيئة. إذا كان الأمر كذلك، فإن عدم الترابط البيئي يستطيع تفسير قطة شرودنجر، لذا لا توجد حاجة للجاذبية الكمية. وإذا لم يكن الاختزال الموضوعي على درجة كافية من قوة التأثير تتيح قياسه تجريبيًّا، فلن يستطيع أن يفعل ما يريده روجر منه.

تمثلت حجة روجر الثانية في أن لدى الاختزال الموضوعي تأثيرًا مهمًّا على المخ، ربما عن طريق تأثيره في التدفقات المترابطة من خلال الأنيبيبات الدقيقة. في الواقع، إنني لست متخصصًا في عمل المخ، لكن يبدو أن هذا الأمر غير محتمل إلى حد بعيد، حتى إن كنت أعتقد في الاختزال الموضوعي، وبالطبع لست كذلك. ولا أستطيع أن أتصور أن المخ يحتوي على منظومات معزولة بدرجة كافية حتى يمكن تمييز الاختزال الموضوعي عن عدم الترابط البيئي، وإذا كانت معزولة تمامًا فلن تستطيع التفاعل بسرعة كافية كي تشترك في إجراء العمليات العقلية. والحجة الثالثة لروجر هي أن الاختزال الموضوعي يُعد ضروريًّا نوعًا ما لأن فرضية جودل تشير إلى أن العقل الواعي ليس قابلًا للقياس. وبعبارةٍ أخرى، يعتقد روجر أن الوعي شيء خاص بالكائنات الحية فقط ولا يمكن محاكاته على جهاز كمبيوتر. علاوةً على ذلك، لم يوضح روجر كيف يمكن للاختزال الموضوعي تفسير الوعي، إلى جانب أن مجادلته بدت وكأنها تشير إلى أن الوعي لغز وأن الجاذبية الكمية لغز آخر، لذلك لا بد من أن تكون بينهما علاقة.

بصفةٍ شخصية، أشعر بعدم ارتياح عندما يتحدث الناس — خاصةً المختصين بعلم الفيزياء النظرية — عن الوعي؛ إذ إن الوعي ليس خاصية نستطيع قياسها من الخارج. وإذا أمكن ظهور رجل أخضر ضئيل الحجم على عتبة بابنا غدًا، لن تكون لدينا وسيلة نقول بها هل هذا الرجل واعٍ أو لديه وعي بذاته أو أنه مجرد روبوت. فأنا أفضّل أن أتحدث عن الذكاء الذي يُعد خاصية يمكن قياسها من الخارج، ولا أرى سببًا لعدم محاكاة الذكاء على جهاز كمبيوتر. وبالتأكيد نحن لا نستطيع في الوقت الحالي محاكاة الذكاء البشري — كما أوضح روجر في لعبة الشطرنج — إلا أن روجر نفسه أقر بعدم وجود حد فاصل بين الذكاء البشري وذكاء الحيوان. لذلك، سيكون كافيًا لنا أن نضع في الاعتبار ذكاء دودة الأرض، ولا أعتقد أن ثمة أي شك في أننا نستطيع محاكاة مخ دودة الأرض على جهاز كمبيوتر. وتُعتبر معالجة جودل لهذا الأمر غير ذات صلة لأن دود الأرض ليس معنيًّا بالجمل Π_1.

طبقًا للانتقاء الطبيعي لداروين، كان من المفترض أن يحدث تطور من مخ دود الأرض إلى المخ البشري. وكانت الخاصية المختارة المُستند إليها في ذلك هي القدرة على الهروب من الحيوانات والتكاثر، وليست القدرة على حل المسائل الرياضية. لذلك مرةً أخرى، أقول إن فرضية جودل ليست ذات صلة، حيث إن هذه القضية متعلقة بأن الذكاء اللازم للبقاء على قيد الحياة يمكن استخدامه أيضًا لصياغة البراهين والأدلة الرياضية. لكنّ هذا أمرٌ أحيانًا يصيب وأحيانًا يخطئ، وبالتأكيد ليس لدينا إجراء دقيق معلوم للتحكم فيه.

لقد ذكرت لكم في الفقرات السابقة لماذا لا أتفق مع روجر في الحجج الثلاث التي قدمها بشأن أن هناك اختزالًا موضوعيًّا للدالة الموجية، وأن له دورًا في عمل المخ، وأنه ضروري لتفسير الوعي، والآن أرى أنه من الأفضل أن أترك الرد لروجر.

الفصل السابع

رد روجر بنروز

في مستهل الأمر، أود أن أعبر عن امتناني وتقديري لكل من أبنر ونانسي وستيفن بشأن التعليقات التي أبدوها والتي أرغب في إبداء عدد قليل من الملاحظات ردًّا عليها. وفيما يلي، سوف أرد على تعليقاتهم، كل على حدة.

الرد على أبنر شيموني

في البداية، دعوني أقل إنني أقدر تعليقات أبنر تقديرًا بالغًا، حيث أعتقد أنها مفيدة بدرجة كبيرة. ومع ذلك فإنه — بالتركيز على قضية القابلية للقياس — يرى أنني ربما أحاول صعود الجبل الخطأ! وبذلك، إذا كان يشير إلى أن هناك العديد من التجليات المهمة للعقلية وليس القابلية للقياس، إذن فأنا أتفق معه تمامًا، وأوافق أيضًا على أن برهان الغرفة الصينية لجون سيرل يقدم لنا حجة مقنعة معارضة لموقف «الذكاء الاصطناعي القوي» الذي يؤكد أن الحساب بمفرده يمكنه أن يعيد الحياة مرةً أخرى إلى العقلية الواعية. وفي المقام الأول، كان برهان سيرل الأصلي معنيًّا بالخاصية العقلية لـ «الفهم»، شأنه في ذلك شأن مناقشتي لفرضية «جودل»، لكن برهان الغرفة الصينية يمكن استخدامه أيضًا (ربما حتى بفاعلية أكبر) لمعارضة خواص عقلية أخرى، مثل: الإحساس بصوت موسيقى أو إدراك اللون الأحمر. والسبب في عدم استخدامي هذا الأسلوب الجدالي في مناقشتي أنه ذو طبيعة سلبية بالكامل، ولا يقدم لنا أية معلومات حقيقية حول ما

يحدث فعليًّا مع الوعي، وهو لا يقترح أيضًا أي اتجاه علينا أن نتخذه إذا كنا نحاول أن نتحرك نحو أساس علمي للعقلية.

حري بالذكر أن منطق سيرل معنيٌّ فقط بالفرق بين المقاربتين (أ) و(ب)، إذا ما استخدمت المصطلحات التي استعنت بها في الفصل الثالث (انظر أيضًا كتاب Shadows of the Mind الصفحات ١٢–١٦). بعبارة أخرى، إنه يرغب في توضيح أن الأوجه الداخلية للوعي لا يُعبر عنها بوضوح بواسطة الحساب. وهذا ليس كافيًا لي، لأنني أحتاج لتوضيح أن التجليات أو الأوجه الخارجية للوعي لا يمكن الوصول إليها أيضًا من خلال الحساب. وفي الواقع، فإن إستراتيجيتي لا تتمثل في محاولة حل المشكلات الداخلية الأكثر صعوبة في هذه المرحلة، بل محاولة عمل شيء أكثر بساطةً في البداية، من خلال محاولة فهم نوع الفيزياء الذي يمكنه إبراز السلوك الخارجي الذي يمكن أن يتبدى بواسطة كائن حي واعي، لذلك فإن الفرق بين المقاربتين (أ) و(ج) أو (ب) و(ج) هو الذي يعنيني عند هذه المرحلة. وحجتي في ذلك أنه يمكن إحراز بعض التقدم في الواقع هنا، ومن المتفق عليه أنني لم أحاول حتى الآن معارضة أي من النجاحات الفعلية التي تحققت بالفعل، لكنني أؤمن بأننا إذا استطعنا في البداية أن نناقش أحد هذه النجاحات البارزة، سنصبح عندئذٍ أكثر قدرةً على تحديد ملامح الأسلوب الذي سيصل بنا إلى النجاح الفعلي انطلاقًا من موقعنا المتميز الجديد.

في اعتراضاته، يشير أبنر إلى ردي على مراجعة هيلاري بوتنام لكتاب Shadows of the Mind، موضحًا أنه ليس مقتنعًا بما ذكرته. في الواقع، لم أبذل أية محاولة حقيقية للرد على بوتنام بالتفصيل، لأنني لم أعتقد أن صفحات الرسائل في مجلة هي المكان المناسب للدخول في مناقشة مستفيضة. فقد كنت أريد فقط، من وجهة نظري، أن أشير إلى أن انتقادات بوتنام ما هي إلا تقليد مبالغ فيه، وقد ضايقتني بصفة خاصة لأنه لم يقدم فيها أي دليل على قراءة أجزاء الكتاب التي تناولها في الانتقادات التي أثارها. وفي الجريدة (الإليكترونية) «فيزيك»، سوف أرد على عدد من المراجعات المختلفة لكتاب Shadows of the Mind بصورةٍ أكثر تفصيلًا، وآمل أن يُجيب هذا

الرد عن النقاط التي أعرب أبنر عن قلقه بشأنها.[1] في الواقع، أعتقد أن القضية الخاصة بـ«جودل»، بصفةٍ أساسية، على درجة بالغة من الفاعلية والتأثير، مع أن بعض الناس يبدون مترددين في اتخاذها منهجًا لهم. وفي حقيقة الأمر، إنني لن أتراجع عما أؤمن بأنها مجادلة صحيحة بصفة أساسية لمجرد مواجهة بعض الناس صعوبة في التعامل معها أو فهمها! والنقطة المهمة لي أنها تزودنا بمعلومات مهمة تدلنا على نوع الفيزياء الذي من المحتمل أن يشكّل أساس ظاهرة الوعي، مع أن هذا وحده لن يقدم لنا الإجابة بالتأكيد.

أعتقد أنني أتفق بصفة أساسية مع النقاط الإيجابية التي ذكرها أبنر؛ فقد عبر عن حيرته بشأن عدم ذكر البحث الفلسفي لوايتهيد سواء في كتاب Emperor's New Mind أو كتاب Shadows of the Mind. ومن جانبي، يُعد السبب الأساسي وراء ذلك هو الجهل به، ولا أعني بذلك قول إنني لم أكن مدركًا مكانة وايتهيد العامة التي بموجبها التزم في منهجه بأحد أشكال «مذهب شمول النفس» panpsychism. فما أقصده هو أنني لم أقرأ أي عمل فلسفي لوايتهيد بالتفصيل، وبالتالي كنت مترددًا في التعليق على بحثه أو على مدى قربه من أفكاري أو بعده عنها. وأعتقد أن موقفي العام ليس بعيدًا عما أوضحه شيموني، مع أنني لم أستعد لشرح أية نقاط محددة خاصة بهذا الأمر، ويرجع هذا جزئيًّا إلى عدم الاقتناع الكامل بما أؤمن به في الواقع.

علاوةً على كل ما سبق، أجد أن «أفكار وايتهيد المحدثة» التي عرضها أبنر لافتة للنظر بصفة خاصة، وتبدو محتملة في ظاهر الأمر. والآن فإنني أعرف أن الشيء الذي أدركه جيدًا وأفكر فيه كثيرًا قريب جدًّا مما يعبر عنه أبنر بوضوح شديد. بالإضافة إلى ذلك، فإن أبنر محق في أن حالات التشابك واسعة النطاق ضرورية لوحدة العقل الفردي لتظهر كأحد أشكال حالة

---

[1] يمكنك الحصول على المجلة الآن للاطلاع على رد بنروز، إصدار يناير ١٩٩٦؛ عنوان الموقع: http://psyche.cs.monash.edu.au/psyche-index-v2_1.html، وتوجد الآن نسخة مطبوعة، صادرة عن إم آي تي بريس (١٩٩٦).

كمية مجمعة. ومع أنني لم أؤكد صراحةً، في أي من كتابيّ، على الحاجة إلى أن تصبح العقلية «أساسية أنطولوجيًّا في الكون»، فإنني أعتقد أنه من الضروري إتاحة شيء من هذا القبيل. ومما لا شك فيه أنه يوجد نوع ما من العقلية البدائية التي تصاحب كل حدث للاختزال الموضوعي، طبقًا لوجهة نظري، لكن ينبغي أن تكون نسبة توظيفها «ضئيلة» للغاية. ودون حدوث تشابك واسع الانتشار مع هيكل عالي التنظيم، متوافق بصورة ممتازة مع نوع معين من «القدرة على معالجة المعلومات» — كما يحدث في المخ — فلا يكون من المفترض أن تظهر عقلية حقيقية بصورة ملحوظة. وأعتقد أن الأمر يرجع فقط إلى أن أفكاري صيغت هنا على نحو ركيك جدًّا مما أفضى إلى أنني لم أغامر بالإفصاح عن آراء أوضح متعلقة بموقفي تجاه هذه الموضوعات. وأنا ممتن بالتأكيد لأبنر على تعليقاته التوضيحية.

وإنني موافق أيضًا على أنه يمكن أن تكون هناك بعض الإدراكات المهمة التي يمكن الحصول عليها من خلال التعرف على تناظرات جديدة ممكنة واكتشافات تجريبية مستقاة من علم النفس. وإذا كانت التأثيرات الكمية مهمة حقًّا لعمليات التفكير الواعي التي نجريها، إذن ينبغي أن نبدأ في رؤية بعض ما تحويه هذه الحقيقة من معلومات ضمنية في أوجه تفكيرنا. من ناحية أخرى، لا بد أن نلتزم الحرص التام — في هذا النمط من المناقشة — بحيث لا نسرع في التوصل إلى النتائج ووضع التناظرات الزائفة في الاعتبار، حيث إن المجال رحب ولديه القدرة على استيعاب الكثير من الاحتمالات. مع هذا فقد تكون هناك تجارب حاسمة معقولة يمكن إجراؤها، وقد يكون من المثير بالفعل اكتشاف مثل هذه الاحتمالات. وبالطبع، ربما تكون هناك أنواع أخرى من الاختبارات التجريبية التي يمكن إجراؤها والتي ربما تكون أكثر ارتباطًا بافتراض الأنيبيبات الدقيقة.

ذكر أبنر في اعتراضاته على منهجي أفكار ميلنيك عن ميكانيكا الكم غير المرتبطة بفضاء هيلبرت، وهذا النوع من تعميم إطار نظرية الكم دائمًا ما كان يجذبني، وأعتقد أنه ينبغي إخضاعه لمزيد من الدراسة. مع ذلك فإنني لست مقتنعًا كليةً أن هذا النوع من التعميم بالذات هو المطلوب، وثمة وجهان لهذه

الفكرة يثيران قلقي بصفة خاصة: أحدهما أن هذا التعميم — كما في عدد من المناهج الأخرى الخاصة بقضية (تعميم) ميكانيكا الكم — يركز في الواقع على مصفوفة الكثافة، بدلًا من الحالة الكمية، باعتبارها الوسيلة المُستخدمة لوصف الواقع. في ميكانيكا الكم العادية، يشكّل فضاء مصفوفات الكثافة مجموعة محدبة convex set، كما أن «الحالات المجردة» التي يمكن وصفها بمتجه واحد فردي تحدث على حدود هذه المجموعة. وتتضح هذه الصورة من فضاء هيلبرت عادي، يُعد مجموعة فرعية لناتج تنسور فضاء هيلبرت ومترافقه المركب. وفي تعميم ميلينك، لا تزال الصورة العامة لـ«مصفوفة الكثافة» موجودة، لكن دون وجود لفضاء هيلبرت خطي أساسي يمكن منه تكوين المجموعة المحدّبة. إنني لست معترضًا على فكرة التعميم لكن بعيدًا عن مفهوم فضاء هيلبرت الخطي، كما أنني أشعر بالقلق تجاه فقدان الأوجه تامة الشكل (التحليلية-المركبة) لنظرية الكم، حيث يبدو أن هذا الفقدان هو إحدى سمات هذا المنهج. لا يمكن لأحد أن يحتفظ بنظير متجه حالة، طبقًا لفهمي، لأنه من الضروري الاحتفاظ فقط بمتجه حالة مناسب للمرحلة. وهذا يجعل حالات التراكب المركبة لنظرية الكم غامضة بصفة خاصة داخل إطار الشكلية. وبالطبع، من الممكن أن نطرح للجدال أن هذه التراكبات هي السبب وراء جميع المشكلات على النطاق الماكروسكوبي وقد يتعين علينا التخلص منها. ومع ذلك فإنها أساسية على المستوى الكمي، وأنا أعتقد أنه بأسلوب تعميم الأشياء هذا، قد نفقد الجزء الإيجابي الأكثر أهمية في نظرية الكم.

يرتبط قلقي أيضًا بحقيقة أن الجوانب غير الخطية لميكانيكا الكم المع(أ)مّمة ينبغي أن تتهيأ كي تتناول عملية القياس، وذلك لوجود عنصر لاتناظر زمني متضمَّن هنا (انظر كتاب Emperor's New Mind، الفصل السابع). وفي الواقع، إنني لا أرى أن هذا الجانب يلعب دورًا في خطة ميلنيك كما هو واضح.

في الختام، ينبغي أن أعرب عن دعمي لمطلب وضع مناهج نظرية أفضل تُعدل من خلالها القواعد الأساسية لميكانيكا الكم، وكذلك مطلب

إجراء التجارب التي قد تستطيع تمييز هذه المناهج عن نظرية الكم التقليدية. وحتى الآن، لم أصادف أي اقتراح لتجربة حالية ذات جدوى تكون قادرة على اختبار النمط المحدد للمنهج الذي أسانده في الفصل الثاني. وفي الواقع، إننا لا نزال نتقدم بخطوات محدودة حتى الآن، لكن ربما يأتي شخص في المستقبل بفكرة أفضل للاختبار.

الرد على نانسي كارترايت

في البداية، شعرت بالتشجيع (والإطراء) عندما سمعت أن كتابي Shadows of the Mind قد نوقش على نحو جاد في سلسلة الندوات التي عقدتها إل إس إي كولدج وكينجز كولدج التي أشارت إليها نانسي في تعقيبها على الكتاب. ومع ذلك فإن نانسي تثير شكوكًا متعلقة بأنه يتعين علينا محاولة الإجابة عن الأسئلة المتعلقة بالعقل في إطار الفيزياء وليس البيولوجيا. وفي هذا الصدد، ينبغي أن أوضح أولًا أنني بالتأكيد لا أقول إن البيولوجيا لا تعتبر مهمة في محاولاتنا لتناول هذه المسألة. في الواقع، إنني أعتقد أنه من المحتمل أن يعتمد التقدم الفعلي في المستقبل القريب على الجانب البيولوجي أكثر من اعتماده على الجانب الفيزيائي، ومع هذا فإن ذلك يرجع بصفة أساسية إلى أن ما نحتاجه من الفيزياء، في رأيي، هو ثورة كبرى؛ من يدرى متى سيحدث ذلك!

لكنني أفترض أن هذا النوع من التنازل ليس كل ما تصبو إليه نانسي — باعتباره شيئًا يمكن أن يؤخذ في الاعتبار فيما يتعلق برؤيتي للبيولوجيا على أنها قادرة على توفير «المقوِّم الأساسي» في فهم العقلية في إطار علمي. وفي الحقيقة قد يكون من الممكن، من وجهة نظري الشخصية، أن يكون هناك كيان واعٍ ليس بيولوجيًّا على الإطلاق؛ بالمعنى الذي نستخدم به مصطلح «البيولوجيا» في الوقت الحالي. لكن قد لا يكون ممكنًا لأي كيان أن يكون واعيًا إذا لم يكن مشتملًا على نمط معين من العملية الفيزيائية التي أصر على أنها جوهرية.

وبهذا القول، فإنني لست واضحًا على الإطلاق تجاه موقف نانسي فيما يخص نوع العلاقة المفترض أن تُقام بين البيولوجيا والفيزياء. كما أرى أيضًا أنها متخذة موقف براجماتي تجاه هذه الموضوعات، حيث إنها تبدي موافقتها على أن الوعي مسألة فيزيائية إذا كان ذلك يساعدنا في تحقيق التقدم. لذلك فهي تسأل: «هل يمكنني التركيز على برنامج بحثي معين يستطيع أن يساعدنا فيه الفيزيائيون، وليس البيولوجيين، في تحقيق التقدم بطرق جوهرية؟» في الواقع، إنني أعتقد أن اقتراحاتي تقود إلى برنامج أكثر تحديدًا مما يبدو أنها تقترحه، وأزعم أيضًا أنه ينبغي علينا أن نبحث عن تركيبات في المخ مشتملة على بعض الخصائص الفيزيائية بالغة الوضوح، حتى تتيح وجود الحالات الكمية الممتدة مكانيًّا والمحمية بصورة جيدة واستمرارها على الأقل لمدة ثانية واحدة، في حين أن حالات التشابك المتضمَّنة في هذه الحالة تعطي لها حيزًا للانتشار على مساحات كبيرة من المخ، ومن المحتمل أن تتضمن عدة آلاف من الخلايا العصبية في آن واحد. ولدعم حالة كهذه، نحتاج إلى تركيبات بيولوجية ذات بنية داخلية بالغة الدقة — ربما تكون شبيهة بالتركيب البلوري — وتكون قادرة على التأثير بقوة على قدرات المشابك العصبية. من ناحية أخرى، فإنني لا أرى أن النقل العصبي المعتاد كافٍ في حد ذاته لأنه لا توجد أية فرصة حقيقية لتحقيق العزل المطلوب. ويمكن أن يكون للشبكات الحويصلية ما قبل المشبكية وما يشبهها — كما اقترح كل من بك Beck وإكليس Eccles — دور، لكن طبقًا لأسلوبي في التفكير، يبدو أن الأنيبيبات الدقيقة للهيكل الخلوي تمتلك خصائص عديدة لها علاقة بالموضوع. وربما يكون هناك تركيبات عديدة أخرى تقع على هذا المقياس نفسه (مثل الكلاثرينات) التي تلزم لاستكمال الصورة. وتقترح نانسي أن الصورة التي أعرضها ليست مفصلة للغاية، لكن يبدو لي أنها أكثر تفصيلًا من أغلب الصور الأخرى التي رأيتها، وأنها تنطوي على احتمال تحقيق نجاح أكبر من خلالها بأسلوب محدد للغاية في ظل وجود العديد من الفرص للاختبار التجريبي. وأنا أوافق على أنه لا يزال أمامنا الكثير قبل أن نستطيع الاقتراب من الصورة «الكاملة» — لكنني

أعتقد أننا لا بد من أن نتقدم إلى الأمام بحذر — ولا أتوقع التوصل إلى اختبارات محددة في الوقت الراهن؛ إذ أن ذلك شيء يحتاج إلى جهد أكبر.

يبدو أن حجة نانسي الأكثر جدية تتناول بصورة أكبر الدور الذي ترى أن الفيزياء تلعبه في نظرتنا الشاملة إلى العالم. وفي هذا الصدد، أعتقد أنها ربما تنظر إلى الفيزياء على أن هناك مغالاة في تقدير مكانتها. وقد يكون هذا صحيحًا، كما قد يكون الأمر أيضًا متعلقًا بأن وجهة النظر حول العالم التي يحاول الفيزيائيون في وقتنا الراهن تقديمها ربما تكون مبالغًا فيها بصورة كبيرة فيما يتعلق باقترابها من الكمال، أو حتى فيما يتعلق بمدى صحتها.

ترى نانسي أن النظرية الفيزيائية الحالية مزيج من النظريات (وهذا صحيح في رأيي)، ولذا فهي تقترح أن الفيزياء ربما تظل هكذا دائمًا. وقد يكون هدف الفيزيائيين النهائي الرامي إلى التوصل إلى صورة موحّدة حلمًا يتعذر في الواقع تحقيقه. وفي هذا السياق، تتبنى نانسي وجهة نظر تقول إن الميتافيزيقيا، وليس العلم، هي المسئولة عن تناول هذه المسألة، وبصفةٍ شخصية لست متأكدًا من الموقف الواجب اتخاذه لكنني في الوقت نفسه لا أعتقد أننا في حاجةٍ إلى أن نبعد عن محور تركيزنا كل هذا البعد لنضع في اعتبارنا المطلوب منا القيام به. فالتوحيد موجود في جميع الاتجاهات الفيزيائية، وأرى أسبابًا كثيرة تدعو لتوقع استمرار هذا الاتجاه في المستقبل، ولكن قد يلزم الأمر تعبيرًا تشكيكيًّا جريئًا لتأكيد عكس ذلك. والآن، دعونا نتناول ما أعتبره الجزء الرئيسي في «مزيج» النظرية الفيزيائية الحديثة، وبالتحديد الأسلوب الذي يُستخدم للجمع بين المستويين الكمي والكلاسيكي الخاصين بالوصف معًا، على نحو غير مقنع تمامًا من وجهة نظري. ويستطيع المرء أن يتخذ وجهة النظر القائلة إننا لا بد أن نتعلم ببساطة أن نعيش بنظريتين غير متوافقتين بصورة أساسية ويمكن تطبيقهما على مستويين مختلفين (ووجهة النظر هذه هي تقريبًا — حسب افتراضي — وجهة النظر التي عبر عنها بور). والآن، قد نكون قادرين على التخلي عن هذا الموقف لعدة سنوات قادمة، لكن مع ازدياد دقة القياسات

وبداية اكتشاف الحد الفاصل بين هذين المستويين، سنكون راغبين في معرفة كيف تتعامل الطبيعة فعليًا مع هذا الحد الفاصل. وربما يكون الطريق الذي تسلكه بعض المنظومات البيولوجية معتمدًا بصورة حاسمة على ما يحدث على هذا الحد الفاصل. إنني أفترض أن التساؤل الآن يكمن فيما إذا كنا نتوقع أن نجد نظرية رياضية فعّالة تستطيع التعامل مع ما يبدو لنا فوضى مزعجة، أو ما إذا كانت الفيزياء في حد ذاتها حالة من الفوضى المربكة على هذا المستوى. بالتأكيد الإجابة بالنفي!

لقد أخذت انطباعًا من ملاحظات نانسي أنها مستعدة لتقبل وجود الفوضى المربكة في قوانين الفيزياء عند هذه المرحلة.[٢] ربما يكون هذا واحدًا من الأمور التي تقصدها من أن البيولوجيا لا يمكن اختزالها إلى الفيزياء. وبالطبع، قد تكون هناك مؤشرات عديدة مركبة غير معلومة لها أدوار مهمة عند هذا المستوى في المنظومات البيولوجية. ومن أجل التعامل مع هذه المنظومات — حتى لو كانت جميع المبادئ الفيزيائية الضمنية معلومة — قد يكون ضروريًّا من الناحية العملية تبني مناهج توظف كل أنماط التخمينات والإجراءات التقريبية والأساليب الإحصائية، وربما الأفكار الرياضية الجديدة من أجل تقديم معالجة علمية مؤثرة بصورة معقولة. لكن انطلاقًا من وجهة نظر الفيزياء القياسية، حتى بالرغم من أن

---

[٢] في أثناء المناقشة، أكدت نانسي كارترايت موقفها تجاه هذه القضية، حيث قالت:

«يعتقد روجر أن الفيزياء التي لا تستطيع التعامل مع منظومات مفتوحة هي فيزياء غير فعّالة، على النقيض من ذلك فأنا أعتقد أنها قد تكون فيزياء جيدة جدًّا في الواقع، إذا كانت قوانين الطبيعة مزيجًا، حسب تصوري لها. وإذا كان العالم مليئًا بالخصائص غير القابلة للاختزال إلى خصائص فيزيائية، لكنها تتفاعل سببيًّا معها، حينئذٍ فإن الفيزياء الأكثر دقة ستكون بالضرورة فيزياء تظل جميع العوامل الأخرى ثابتة في ظلها دون تغيير بحيث تكون قادرة على تفسير كل شيء متعلق بالمنظومات المنغلقة فقط.

ما وجهة النظر المحتمل أن تكون صحيحة من بين هذه الآراء؟ إنها، كما قلت، مشكلة ميتافيزيقية، بمعنى أن أي حل لها يتجاوز الدلائل التجريبية التي لدينا، بما فيها تاريخ العلم. وأنا أحث على تجنب هذا النوع من الميتافيزيقا قدر الإمكان، عندما تتطلب القرارات المنهجية أي التزام بطريقة أو بأخرى تجنبًا للوقوع في حيرة شديدة للغاية بين أمرين. وحين يتعين علينا الالتزام بأحد هذين الأمرين، فإن علينا تقدير الاحتمالات بأسلوب بالغ الاختلاف عن أساليب أولئك الذين يضعون ثقتهم الكاملة في الفيزياء. إن العلم الحديث مزيج من الكثير من العلوم، وليس منظومة موحدة، وإذا تعين علينا أن نحدد موقفنا تجاه تركيب الواقعية، فإنني أعتقد أنه من الأفضل لنا أن نخطط لهذا الموقف استنادًا إلى أفضل التجليات للواقعية في حياتنا، وهذا هو العلم الحديث كما هو موجود بالفعل، وليس كما نتخيل وجوده.»

تفاصيل إحدى المنظومات البيولوجية قد تسبب لنا فوضى مربكة، فإن هذه الفوضى لن تكون في القوانين الفيزيائية الضمنية ذاتها. وإذا كانت القوانين الفيزيائية كاملة في هذا الخصوص، إذن «تكون الخصائص البيولوجية تابعة للخصائص الفيزيائية» دون أدنى شك.

مع ذلك، فإنني أؤكد أن قوانين الفيزياء القياسية ليست كاملة بهذا الخصوص، والأسوأ من هذا، حسبما أزعم، أنها ليست صحيحة تمامًا بطرق يمكن أن تكون ذات صلة على نحو ضروري بالبيولوجيا. إن النظرية القياسية تتيح وجود ثغرة من نوع ما، كما يحدث في العملية **R** — اختزال متجه الحالة — الخاصة بميكانيكا الكم التقليدية. ومن وجهة النظر المعتادة، فإن ذلك يؤدي إلى حدوث عشوائية واقعية، ويتعذر رؤية كيف يمكن أن يكون لمبدأ «بيولوجي» جديد دور هنا دون أن يتدخل في واقعية هذه العشوائية، الأمر الذي قد يعني تغيير النظرية الفيزيائية. لكنني أزعم أن الأمور أسوأ من ذلك، حيث إن الإجراء **R** الخاص بالنظرية القياسية ليس متوافقًا مع التطور الوحدوي أو **U**. وإذا طرحنا الأمر بصراحة شديدة، فإننا نجد أن عملية التطور الوحدوي لنظرية الكم القياسية غير متطابقة إجمالًا مع الحقائق الواضحة المُستقاة من الملاحظة. وفي وجهة النظر القياسية، يمكن تجنب ذلك بفاعلية عن طريق توظيف عدد من الاحتمالات بدرجات مختلفة، لكن من ناحية أخرى ستظل الحقيقة المؤلمة باقية. وفي رأيي، لا يوجد أي شك في أن هذه المشكلة فيزيائية، أيًّا كانت صلتها بالبيولوجيا، وربما يكون القول إن طبيعة الفيزياء، التي هي «مزيج»، تستطيع أن تتعامل ببساطة مع هذا الموقف وجهة نظر مترابطة، لكنني أشك كثيرًا في أن يكون عالمنا بالفعل شبيهًا بذلك الوضع.

بعيدًا عن هذا الموضوع، فإنني ببساطة لا أفهم ماهية البيولوجيا التي لا تمارس التبعية للفيزياء، والأمر نفسه ينطبق أيضًا على الكيمياء. (وفي هذه النقطة، لا أقصد ازدراء أي من هذين المنهجين العلميين.) وقد ذكر لي البعض أمرًا شبيهًا بذلك، حيث قالوا إنهم لا يستطيعون أن يتصوروا فيزياء لا تكون وظائفها قابلة للقياس، وهذا ليس رأيًا غير طبيعي، لكنّ

«الكون على نمط الدمية» الذي قدمت وصفًا له في أنها مستعدة لتقبل وجود الفوضى المربكة لفصل الثالث يطرح بعض الأفكار حول ما يمكن أن تكون عليه الفيزياء غير القابلة للقياس. وإذا استطاع أحد على نحو مماثل أن يقدم لي فكرة عما يمكن أن تكون عليه «البيولوجيا» التي لا تمارس التبعية للـ«فيزياء» المتطابقة معها، حينئذٍ سيتعين عليّ البدء في التعامل مع هذه الفكرة على نحو جدي.

دعوني الآن أعُد إلى ما اعتبرته التساؤل الأساسي لنانسي كارترايت؛ وهو: لماذا أعتقد أنه ينبغي علينا أن نتطلع إلى فيزياء جديدة تطرح تفسيرًا علميًّا للوعي؟ وإجابتي باختصار أوضحها على النحو الآتي، فوفقًا لمناقشة أبنر شيموني، إنني ببساطة لا أرى أي مجال للعقلية الواعية داخل إطار الصورة الفيزيائية الحالية عن العالم، مع الوضع في الاعتبار أن البيولوجيا والكيمياء يعدان من أجزاء تلك الصورة. علاوةً على ذلك، إنني لا أعرف كيف نستطيع تغيير البيولوجيا كي لا تصبح جزءًا من هذه الصورة دون تغيير الفيزياء. والآن، هل لا يزال هناك من يريد أن يصف وجهة النظر المتخذة عن العالم بأنها «معتمدة على الفيزياء» إذا كانت تحتوي على عناصر من العقلية البدائية على المستوى الأساسي؟ في الواقع، هذا أمر يخص علم المصطلحات الفنية، لكنني أؤيد هذا الوصف على الأقل في الوقت الراهن.

الرد على ستيفن هوكنج

لعل تعليقات ستيفن حول كونه من أنصار الوضعية تؤدي بنا إلى توقع أنه قد يكون أيضًا مؤيدًا لوجهة النظر التي تقول إن الفيزياء «مزيج» من علوم مختلفة. ومع ذلك، فهو يعتبر المبادئ القياسية لميكانيكا الكم ذات وحدة النشاط الكمي غير قابلة للتغيير — طبقًا لما استطعت فهمه — في منهجه للتعامل مع الجاذبية الكمية. لكنني لا أرى في الواقع سببًا لعدم تأييده بشدة لإمكانية أن يكون التطور الوحدوي شبيهًا لشيء آخر أفضل، وأنا — شخصيًّا — سعيد لكونه كذلك، تمامًا كالنظرية الدقيقة الرائعة

لنيوتن عن الجاذبية التي تُعد شبيهة لنظرية أينشتاين. لكن يبدو لي أن ذلك قد لا يكون تأثيره كافيًا للتعامل مع الأفلاطونية الوضعية بكل ما تحمله الكلمة من معنى.

إنني لا أوافق على أن عدم الترابط البيئي بمفرده يستطيع إلغاء حالة تراكب قطة شرودنجر. وكان رأيي عن عدم الترابط البيئي أنه بمجرد أن تصبح البيئة في حالة تشابك على نحو معقد لا يمكن التخلص منه مع القطة (أو مع أية منظومة كمية موضع اعتبار)، فإنه لن يكون هناك أي فرق عملي في حالة اختيار أي نظام سيُتبع للاختزال الموضوعي. لكن دون وجود أي نظام للاختزال، حتى لو كان مجرد نظام مؤقت (مثل نظام FAPP أو لكل الأغراض العملية)، فإن القطة ستظل ببساطة في حالة تراكب. وربما — طبقًا لموقف ستيفن «الوضعي» — فإنه لا يهتم في الواقع بما يكون عليه التطور الوحدوي لحالة القطة، ويحبذ وصف مصفوفة الكثافة «للواقعية». لكن ذلك، في حقيقة الأمر، يفضي بنا إلى التغاضي عن مشكلة القطة — كما أوضحت في الفصل الثاني — حيث إنه لا يوجد شيء في وصف مصفوفة الكثافة يؤكد ما إذا كانت القطة حية أو ميتة، وليست في حالة تراكب للحياة والموت.

فيما يتعلق باقتراحي الذي ينص على أن الاختزال الموضوعي (**OR**) هو أحد تأثيرات الجاذبية الكمية، فإن ستيفن بالتأكيد على حق في قوله: «طبقًا لأفكار الفيزياء المتفق عليها، فإن انحناء [الزمكان] لن يحول دون حدوث تطور هاميلتوني.» لكن المشكلة أنه دون أن يكون لعملية الاختزال الموضوعي دور مهم، تصبح المسافات الفاصلة بين المركَّبات الزمكانية المختلفة كبيرة بصورة متزايدة (كما في حالة القطة)، وتبدو مختلفة بصورة هائلة عن التجربة، وفي هذه المرحلة أعتقد أن الأفكار المتفق عليها لا بد أن تكون خاطئة. علاوةً على ذلك، ومع أن أفكاري بعيدة إلى حد بعيد عن كونها تفصيلية فيما يتعلق بما أعتقد أنه لا بد من أن يحدث عند هذا المستوى، فإنني على الأقل اقترحت معيارًا يمكن من حيث المبدأ أن يخضع للاختبار التجريبي.

وبخصوص احتمالية وجود صلة بين هذه العمليات والمخ، فإنني أوافق على أن هذا يبدو «غير محتمل إلى حد بعيد» — لولا حقيقة حدوث شيء بالغ الغرابة في المخ الواعي الذي يبدو لي (وكذلك لأبنر شيموني) خارج نطاق ما نستطيع أن نفهمه بخصوص الصورة الفيزيائية للعالم في الوقت الحالي. وبالطبع، تُعتبر هذه المعالجة سلبية، وينبغي علينا أن نتوخى الحذر البالغ من أن نهتم بها اهتمامًا أكثر من اللازم. وأعتقد أنه من المهم جدًّا أن نجعل علم وظائف الأعصاب في المخ قيد البحث والدراسة، وكذلك الأوجه الأخرى للبيولوجيا، بحذر شديد لمحاولة التوصل لما يحدث بالفعل.

في نهاية المطاف، ذكر ستيفن في اعتراضه الثالث استخدامي لمعالجة جودل. والسبب الرئيسي لاتباعي هذا الأسلوب في التوضيح أنه يمكن قياسه والحكم عليه من الخارج (حيث إنني مهتم بالفرق بين المقاربتين (أ) و(ج) أو (ب) و(ج)، كما سبق وذكرت من قبل، وليس الفرق الخارجي غير القابل للقياس بين المقاربتين (أ) و(ب)). علاوةً على ذلك، فإن النقطة المحددة التي كنت أوضحها — فيما يتعلق بالاختيار الطبيعي — تتمثل في أن إحدى القدرات المعينة الخاصة بالتعامل مع الرياضيات لم تكن قد اختيرت لهذا الغرض. وإذا كان الأمر كذلك كنا سنظل في إطار معالجة جودل، وهو الأمر الذي لم يحدث. وفي هذا الصدد على وجه الخصوص، فإن المحور الأساسي للمعالجة يتمركز حول أن قدرةً عامةً على الفهم هي التي اختيرت، والتي اتضح أنها يمكن أن تُطبق على الفهم الرياضي بصورة طارئة. وهذه القدرة ليست في حاجة لأن تكون لاخوارزمية (بسبب معالجة جودل)، لكنها تُطبَّق على الكثير من الأشياء بخلاف الرياضيات. بالإضافة إلى ذلك، فإنني لا أعرف شيئًا عن دود الأرض لكنني على يقين من أن الفيلة والكلاب والسناجب وكثيرًا من الحيوانات الأخرى تتغذى عليها.

الملحق الأول

فرضية جودشتين والتفكير الرياضي

في الفصل الثالث، قدمت برهانًا على صحة أحد أشكال فرضية جودل، لدعم اعتراضي على فكرة أن الفهم الإنساني لا بد من اشتماله على مقومات لا يمكن محاكاتها من خلال إجراءات حسابية. لكن الناس في أحوال كثيرة يجدون صعوبة في تقدير أهمية صلة فرضية جودل الوثيقة بالأسلوب الذي نفكر به، حتى في حالة التفكير الرياضي. وأحد أسباب ذلك أنه طبقًا للطريقة التي تُقدم بها الفرضية عادةً، يبدو أن العبارة الفعلية «غير القابلة للبرهنة» الخاصة بإجراء جودل عديمة الصلة بأية نتيجة رياضية ذات أهمية.

وما تقوله لنا فرضية جودل إنه لأي إجراء «برهنة» حسابية P (شامل بصورة كافية) نجد أننا مستعدون للثقة به باعتباره إجراءً يمكن الاعتماد عليه دون أدنى معارضة، نستطيع وضع افتراض حسابي واضح $\mathrm{G}(P)$ يتعين علينا أيضًا أن نثق بكونه معترفًا به من الجهات كافة، لكن يصعب الحصول عليه عن طريق إجراء البرهنة الأصلي P. والصعوبة التي نشير إليها هنا تتمثل في أنه من الصعب إلى حد بعيد فهم العبارة الرياضية الفعلية $\mathrm{G}(P)$ الناتجة عن التطبيق المباشر لادعاءات جودل وخلوها من أية فائدة رياضية جوهرية واضحة، بصرف النظر عن حقيقة أننا نعلم أنها

حقيقية لكن لا يمكن استنباطها باستخدام الإجراء P. وطبقًا لذلك، يجد البعض حتى الرياضيين أنفسهم — من حين لآخر — أنهم سعداء بتجاهل العبارات الرياضية المماثلة للعبارة $G(P)$.

ومع ذلك فهناك أمثلة لعبارات رياضية خاصة بجودل يمكن فهمها بسهولة، حتى لمن ليست لديهم معرفة وثيقة بالمصطلحات أو الرموز الرياضية بخلاف تلك المُستخدمة في الحساب المعتاد. وقد أثار اهتمامي عام ١٩٩٦ مثال لافت للنظر بصورة خاصة، في محاضرة ألقاها دان إيزاسون Dan Isaacson (بعد إلقاء محاضرات تانر التي اعتُمد عليها في تأليف هذا الكتاب)، لكنني لم أكن أعلم عنه شيئًا عندما وضعت مادة الكتاب. وهذا المثال هو النتيجة المعروفة باسم فرضية جودشتين(١)، وأنا أعتقد أنه لمن المفيد أن أوضح فرضية جودشتين هنا، كي يحصل القارئ على قدر من الخبرة المباشرة بخصوص أية فرضية من نوع فرضية جودل(٢).

ولإدراك ما تؤكد عليه فرضية جودشتين إدراكًا كاملًا، دعنا ننظر إلى أي عدد صحيح موجب، وليكن مثلًا العدد 581، وفي البداية نعبر عنه كحاصل جمع قوى متعددة للعدد 2:

$$581 = 512 + 64 + 4 + 1 = 2^9 + 2^6 + 2^2 + 2^0.$$

(إن هذا هو ما يمكن تضمينه عند صياغة التمثيل الثنائي للعدد 581، أي 1001000101، حيث إن العدد 1 المتكرر يمثل القوى 2 الموجودة في فك المعادلة، بينما تمثل الأصفار القوى الغائبة.) ومن الملاحظ أن «الأسس» في هذه المعادلة، أي الأعداد 9 و6 و2 يمكن أيضًا تمثيلها بهذه الطريقة [$(9 = 2^3 + 2^0)$ و$(6 = 2^2 + 2^1)$ و$(2 = 2^1)$ باعتبار أن $(1 = 2^0)$ و$(2 = 2^1)$]، لنحصل على:

$$581 = 2^{2^3+1} + 2^{2^2+2} + 2^2 + 1.$$

لا يزال لدينا أس في هذا الترتيب، وهو الأس 3، يمكن تعديل هذا التمثيل

مرةً أخرى لأجله ($3 = 2^1 + 2^0$) وهكذا نحصل على:

$$581 = 2^{2^{2+1}+1} + 2^{2^2+2} + 2^2 + 1.$$

بالنسبة للأعداد الأكبر، قد نضطر إلى التعامل مع الأسس الثالثة أو الأعلى منها.

والآن نطبق سلسلة متتابعة من العمليات البسيطة على هذه العبارة، وهذه السلسلة تتراوح بين:

(أ) زيادة «الأساس» بمقدار 1

(ب) طرح 1

والأساس المشار إليه في الإجراء (أ) هو العدد «2» في العبارات السابقة. لكننا نستطيع إيجاد تمثيلات مشابهة للأساسات الأكبر مثل 3 و4 و5 و6 وهكذا. ولنرَ الآن ما يحدث عندما نطبق الإجراء (أ) على العبارة الأخيرة المستخدمة للتعبير عن العدد 581 أعلاه، بحيث تصبح كل القوى 2 القوى 3، فنحصل على:

$$3^{3^{3+1}+1} + 3^{3^3+3} + 3^3 + 1$$

(وهذا، في الواقع، عدد مكون من 40 رقمًا، عند كتابته بالطريقة العادية التي يبدأ العدد فيها كالتالي: ...133027946.) بعد ذلك نطبق الإجراء (ب) لنحصل على:

$$3^{3^{3+1}+1} + 3^{3^3+3} + 3^3$$

(وهذا بالطبع لا يزال عددًا يتكون من 40 رقمًا، يبدأ كالتالي: ...133027946.) والآن نطبق الإجراء (أ) مرةً أخرى لنحصل على:

$$4^{4^{4+1}+1} + 4^{4^4+4} + 4^4$$

(وهو عدد يتكون من 618 رقمًا، بدايته كالتالي: ...12926802.) والآن، يلزم تطبيق الإجراء (ب) أي طرح العدد 1 لنحصل على:

$$4^{4^{4+1}+1} + 4^{4^4+4} + 3 \times 4^3 + 3 \times 4^2 + 3 \times 4 + 3$$

(حيث كل 3 يظهر في هذه العبارة مناظر لكل 9 يظهر في الترميز العادي للنظام العشري عندما نطرح 1 من العدد 10000 لنحصل على العدد 9999.) وباستخدام الإجراء (أ) نحصل على:

$$5^{5^{5+1}+1} + 5^{5^5+5} + 3 \times 5^3 + 3 \times 5^2 + 3 \times 5 + 3$$

(وهو عدد يتكون من 10923 رقمًا وتكون بدايته كالتالي: ...1274.) لاحظ أن المعاملات 3 التي تظهر هنا لا بد أن تكون جميعها أقل من الأساس (هنا الأساس = 5) ولا تتأثر بزيادة الأساس. ومرةً أخرى نطبق الإجراء (ب) لنحصل على:

$$5^{5^{5+1}+1} + 5^{5^5+5} + 3 \times 5^3 + 3 \times 5^2 + 3 \times 5 + 2,$$

وعلينا أن نستمر في عملية التبديل بين الإجراءين (أ) و(ب) قدر استطاعتنا. حريٌّ بالذكر أن الأعداد تزداد دائمًا — على ما يبدو — وقد يكون من الطبيعي أن نفترض أن هذا سيستمر إلى الأبد. ولكنّ الأمر ليس كذلك؛ لأن فرضية جودشتين الرائعة تقول لنا إنه أيًّا كان العدد الصحيح الموجب الذي نبدأ به (بدأنا هنا بالعدد 581)، فإننا ننتهي في آخر المطاف دائمًا بالصفر!

يبدو هذا أمرًا غريبًا بعض الشيء، لكنه في الواقع صحيح، ولإدراك هذه الحقيقة، أنصح القارئ بتجربتها، وليبدأ أولًا بالعدد 3 (حيث $3 = 2^1 + 1$، وبالتسلسل سنحصل على 3, 4, 3, 4, 3, 3, 2, 2, 1, 1, 0)، ثم العدد 4 وهو الأهم (حيث يكون لدينا $2^2 = 4$، لنحصل على تسلسل يبدأ على النحو التالي: 4, 27, 26, 42, 41, 61, 60, 84,... وهكذا، لكنه يصل إلى عدد يتكون من 121210695 رقمًا قبل أن يتناقص ليصل في النهاية إلى الصفر).

إن الأكثر غرابة من ذلك أن فرضية جودشتين هي بالفعل فرضية جودل استنادًا إلى الإجراء المعروف باسم الاستقراء الرياضي[٣]. تذكر أن الاستقراء الرياضي يقدم لنا وسيلةً للبرهنة على أن عبارات رياضية معينة $S(n)$ تظل صحيحة لكل n مهما بلغت قيمتها. يعني ذلك أن هذا الإجراء يوضح في البداية أن العبارات الرياضية تكون صحيحة في حالة $n = 1$، ثم يوضح بعد ذلك أنه إذا كانت العبارات صحيحة بالنسبة لـ n، إذن فلا بد أنها ستكون صحيحة أيضًا بالنسبة لـ $n + 1$. ومن الأمثلة الشائعة على ذلك العبارة التالية:

$$1 + 2 + 3 + 4 + 5 + \cdots + n = \frac{1}{2}n(n + 1).$$

ولإثبات هذا باستخدام الاستقراء الرياضي، نؤكد في البداية أن العبارة الرياضية صحيحة في حالة $n = 1$ (وهذا واضح)، وبعد ذلك نثبت أنه إذا كانت العبارة صحيحة بالنسبة لـ n، إذن فإنها تكون صحيحة أيضًا بالنسبة لـ $n + 1$ — وهذا أمر لا شك فيه — لأن لدينا:

$$\begin{aligned}1 + 2 + 3 + \cdots + n + (n + 1) &= \frac{1}{2}n(n + 1) + (n + 1)\\ &= \frac{1}{2}(n + 1)((n + 1) + 1).\end{aligned}$$

إن ما أوضحه كيربي Kirby وباريس Paris، عمليًّا، أنه إذا كانت P تمثل إجراء الاستقراء الرياضي (إلى جانب العمليات الحسابية المنطقية المعتادة)، إذن يمكن التعبير مرةً أخرى عن $G(P)$ في صورة فرضية جودشتين. وينبئنا ذلك بأننا لو كنا نعتقد أن إجراء الاستقراء الرياضي جدير بالثقة (وهو الافتراض الذي يصعب التشكك في صحته)، إذن لا بد أن نؤمن بصحة فرضية جودشتين، بالرغم من حقيقة كونه غير قابل للبرهنة عليه باستخدام الاستقراء الرياضي بمفرده!

الجدير بالذكر أن «عدم قابلية البرهنة» على فرضية جودشتين لا يحول بيننا وبين رؤيتنا لها على أنها صحيحة في واقع الأمر، حيث إن مداركنا تمكّنا من تجاوز الخطوات المحدودة لعملية «البرهنة» التي استخدمناها من

قبل. وفي الواقع، إن طريقة جودشتين نفسه للبرهنة على فرضيته تمثلت في استخدام أحد الأمثلة على ما أُطلق عليه «الاستقراء فوق المنتهي transfinite induction». وفي السياق الحالي، يقدم هذا أسلوبًا لتأسيس قدرة على الفهم يمكن أن نمتلكها على الفور إذا تعلمنا في الواقع «المنطق» الذي يقول إن فرضية جودشتين صحيحة. ويمكن أن تكون لدينا هذه القدرة إلى حدٍّ بعيد عن طريق دراسة عدد من الحالات الفردية لفرضية جودشتين. وما يحدث أن الإجراء (ب) البسيط يأخذ في «التضاؤل» باستمرار إلى أن تختفي الأسس العليا في النهاية، واحدًا تلو الآخر، حتى لا يتبقى منها شيء، مع أن هذا قد يستلزم عددًا هائلًا من الخطوات.

وما يتبين لنا من هذا كله أن خاصية الفهم ليست شيئًا يمكن حصره للأبد في فئة معينة من القواعد، كما أن الفهم يُعد خاصية تعتمد على إدراكنا. وبالتالي، أيًّا كان الشيء المسئول عن الوعي، فإن الإدراك — على ما يبدو — سيكون له دور بصفةٍ أساسية عندما يكون «الفهم» موجودًا. ولذلك يبدو أن إدراكنا شيء يتضمن عناصر لا يمكن حصرها في قواعد حسابية من أي نوع؛ إذ توجد في حقيقة الأمر أسباب قوية جدًّا للاعتقاد في أن أفعالنا الواعية هي في الأساس «عمليات غير حسابية».

مما لا شك فيه أن هناك «ثغرات» محتملة في هذه النتيجة، وقد يعتمد أنصار وجهة النظر الفلسفية الحسابية المتعلقة بالعقلية الواعية على واحدة أو أكثر من هذه الثغرات. وبصفةٍ أساسية، تتمثل هذه الثغرات في أن قدرتنا على الفهم (الرياضي) قد تنجم عن بعض الإجراءات الحسابية التي لا يمكن معرفتها بسبب تعقيدها، وربما تكون من الممكن معرفتها من حيث المبدأ لكنها ليست صحيحة بصورة شائعة، أو قد تكون غير دقيقة ولكن صحيحة بصورة تقريبية. في كتاب Shadows of the Mind، تناولت في الفصلين الثاني والثالث كل هذه الثغرات المحتملة باستفاضة، وأنصح كل قارئ مهتم بمتابعة هذه الموضوعات على نحو أشمل بالرجوع إليهما. وقد يجد بعض القراء أنه من المفيد لهم أولًا الرجوع إلى مناقشتي المنشورة في مجلة «فيزيك» تحت عنوان «Beyond the Doubting of a Shadow».[٤]

Notes

(1) R. L. Goodstein, On the restricted ordinal theorem, *Journal of Symbolic Logic*, **9**, 1944, 33-41.

(2) See also R. Penrose, On understanding understanding, *International Studies in the Philosophy of Science*, **11**, 1997, 20.

(3) This was shown by L. A. S. Kirby and J. B. Paris in Accessible independence results for Peano arithmetic, *Bulletin of the London Mathematical Society*, **14**, 1982, 285-93.

(4) The reference and www address are cited in the footnote on p. 175. The more complete printed reference is: *Psyche* **2**, (1996), 89-129.

الملحق الثاني

تجارب لاختبار اختزال الحالة المولد بالجاذبية

في الفصل الثاني، قدمت اقتراحًا طبقًا له ينبغي أن يُختزل تراكب كمي لحالتين — تحدث إزاحة للكتلة بينهما — تلقائيًّا إلى حالة أو أخرى، دون أن تكون هناك ضرورة لإجراء أي «قياس» من الخارج للمنظومة. وطبقًا لهذا الاقتراح بعينه، يحدث اختزال الحالة الموضوعي (المُشار إليه بالاختصار OR) بمقياس زمني يبلغ قرابة $T = \hbar/E$، حيث E هي طاقة التجاذب المعروفة بحدوث إزاحة فيها بين الحالتين. وفيما يتعلق بالإزاحة الجاسئة rigid displacement، يمكن أن نعتبر الطاقة E الطاقة اللازمة لإزاحة إحدى حالتي الجسم من مجال الجاذبية الخاص بحالته الأخرى، ويكون هذا مكافئًا لاعتبار E طاقة التجاذب الذاتية للفرق بين مجالي الجاذبية لتوزيع الكتلتين في الحالتين.

في حقيقة الأمر، حدث تطوران يتعلقان بهذه المسألة في الفترة التي انقضت منذ الإصدار الأول لهذا الكتاب، أحدهما نظري والآخر تجريبي (مقترح). ولكلا التطورين علاقة مهمة باعتراض ستيفن هوكنج (ص ١٩٢) الذي قال فيه إنني لم أضع «نظرية مفصلة تمكننا من حساب متى يحدث الاختزال الموضوعي» وبردي على ملاحظته (ص ٢٠٢)

وبتعليقاتي السابقة المتعلقة بالتجارب الممكن إجراؤها في هذا الصدد (ص ١٠٤).

نظريًّا، أجمع البعض على أن اقتراحي الذي قدمته يشوبه عدم الكمال، كما هو موضح في هذا الكتاب (ص ١٠١) وفي القسم (٦-١٢) من كتاب Shadows of the Mind (إلى جانب اشتماله على صعوبات تتعلق بالاقتراح وثيق الصلة الذي قدمه ديوزي عام ١٩٨٩)، دون تقديم بارامترات parameters أساسية للمقياس بخلاف ثابت التجاذب G (و$\hbar$ وc). ونشأ عدم الكمال هذا من حقيقة أنه لا يوجد توضيح وافٍ لأي الحالات سيُفضل أن تُختزل إليها حالة واحدة عامة. وإذا كانت ستصبح الحالات المفضلة «حالات موضعية» يكون لكل جسيم فردي فيها موضع محدد، حينئذٍ ينبغي أن نحصل على قيمة لانهائية لطاقة التجاذب E ذات الصلة، وبالتالي على اختزال لحظي لأية حالة، وهو ما يتعارض كثيرًا مع تأثيرات عديدة ميكانيكية كمية مؤكدة. لكن دون وجود حالات مفضلة، لا يمكن أن نحدد الحالات التي يمكن اعتبارها «حالات تراكب» متغيرة، والحالات (المفضلة) التي من المفترض أن تنحل فيها هذه التراكبات. (تذكر أن هذا الانحلال له فترة عمر $\hbar/E$ طبقًا لنظام الاختزال الموضوعي، وبالنسبة لأية كتلة متناهية مركَّزة في نقطة، يؤدي هذا إلى الحالة $E = \infty$.) وفي صيغة ديوزي الأصلية (١٩٨٩)، هناك مشكلة أخرى ذات صلة تتمثل في عدم حفظ الطاقة، وطبقًا لما أوضحه كل من جيراردي وجراسي Grassi وريميني، قد تؤدي هذه المشكلة إلى عدم التوافق مع الملاحظة بصورة مهولة. وبتقديم بارامتر إضافي — وهو الطول الأساسي λ — استطاع هؤلاء الثلاثة التغلب على عدم التوافق هذا، لكن دون مبرر مسبق لاختيار أية قيمة معينة للبارامتر λ[1]. وفي الواقع، يمكن لأية عملية اختزال حالة في هذا النظام المعدل أن تضع جسيمًا فرديًّا في منطقة يأخذ قطرها القيمة نفسها الخاصة بالبارامتر λ، وليس في نقطة فردية.

أمَّا في النظام الذي أقترحه، فلا يتعين وجود بارامتر إضافي مثل البارامتر λ، إذ إن كل شيء يجب أن يكون محددًا بالثوابت الأساسية (ذات الصلة)

التي لدينا بالفعل، وهي G و$\hbar$ وc (كما أن c في حد ذاته ليس ثابتًا ذا صلة في النظام اللانسبي). بالتالي، كيف يمكن تحديد «الحالات المفضلة»؟ بفرض أن السرعات صغيرة مقارنة بالثابت c، كما أن جهود التجاذب صغيرة أيضًا، تتمثل الفكرة الأساسية في أن هذه الحالات تُعتبر حلولًا ثابتة لما أسميه معادلة شرودنجر-نيوتن. وهذه المعادلة ببساطة هي معادلة شرودنجر (اللانسبية) لدالة موجية Ψ، لكن يوجد بها حد إضافي يوفره جهد التجاذب النيوتني Φ، حيث مصدر Φ هو قيمة توقع توزيع الكتلة المحددة بواسطة Ψ. وبصفةٍ عامة، فإن هذا يسفر عن منظومة مزدوجة مركبة غير خطية خاصة بمعادلات تفاضلية معينة، ولا تزال هذه المعادلات موضع البحث. وحتى في حالة وضع الجسيم في نقطة فردية، فإن استبعاد الحلول الثابتة لهذه المعادلة ليس أمرًا عديم القيمة إن كانت هذه الحلول تؤدي وظيفتها على نحو مناسب، بما في ذلك في حالة اللانهائية. لكن الأبحاث حديثًا توضح أن الحلول المطلوبة موجودة في الواقع للجسيم في النقطة الفردية، وهذا يقدم بعض الدعم الرياضي للاقتراح(٢).

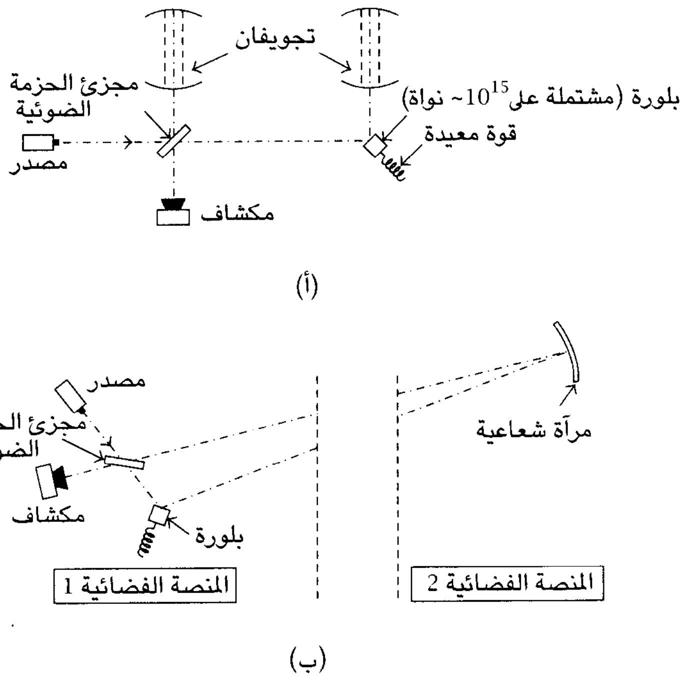
والسؤال الحاسم، بطبيعة الحال، هو ما إذا كان نظام من هذه النوعية يمكن أن يتطابق مع ما يحدث فعليًّا لتراكب كمي ماكروسكوبي. إنه لأمر مثير أن تكون بعض الاقتراحات المعينة الخاصة باختبار هذه المسألة تجريبيًّا ممكن تحقيقها بالفعل. ومع الصعوبة التقنية البالغة، فإن هذه التجارب المقترحة لا يبدو أنها تستلزم أكثر مما يمكن تحقيقه من حيث المبدأ في ظل التكنولوجيا الحالية. وتتمثل الفكرة في وضع بلورة صغيرة الحجم — ربما لا يزيد حجمها عن ذرة غبار — في تراكب كمي لموضعين بينهما إزاحة دقيقة، للتأكد مما إذا كان هذا التراكب سيستمر مترابطًا لجزء كبير من الثانية دون أن تنحل الحالة المتراكبة تلقائيًّا إلى حالة أو أخرى. وطبقًا لنظامي المقترح سابقًا، فإن هذا الانحلال لا بد أن يحدث، بينما تؤكد وجهة النظر التقليدية أن التراكب سيحتفظ بنفسه مستمرًّا لفترة غير محددة، إلا إذا تدخل أي من أشكال عدم الترابط لانحلال الحالة.

والآن دعوني أقدم لكم موجزًا عامًّا لإطار عمل تجريبي يمكن استخدامه[٣]، والشكل الموضح الآتي يبين الترتيب التجريبي الأساسي. وقد أوضحت إطار العمل مستخدمًا الفوتون باعتباره الجسيم الساقط، ومع ذلك فيتعين أن أوضح أنني استعنت بهذا الأمر لتسهيل الفهم على القارئ. والجدير بالذكر أن هذه التجربة يمكن إجراؤها على الأرض بصورةٍ أفضل باستخدام جسيم ساقط من نوع آخر، وليكن النيوترون أو ذرة متعادلة من نوع مناسب. والسبب في ذلك أن الفوتون المطلوب للاستخدام في التجربة — إذا كان فوتونًا بالفعل — لا بد أن يكون فوتون أشعة سينية X-ray photon، وقد يكون إنشاء التجويف المطلوب لفوتون كهذا تحديًا تقنيًّا غاية في الأهمية. (في نسخة التجربة المجراة في الفضاء، يمكن أن تؤدي المسافة بين المنصتين الفضائيتين وظيفة «التجويف».) وللاءمة الوصف المُقدم فيما يأتي، سوف أشير إلى هذا الجسيم ببساطة بالـ«فوتون»، أيًّا كان نوع الجسيم الساقط فعليًّا.

في هذه التجربة، يطلق مصدر فوتوني فوتونًا واحدًا نحو مجزِّئ الحزمة الضوئية beam splitter، وحينئذٍ يعمل مجزئ الحزمة الضوئية على تقسيم الحالة الكمية للفوتون إلى جزأين متساويين في السعة. وأحد طرفي التراكب الناتج لحالة الفوتون (الجزء المنعكس) سيبقى، مثلًا، لنحو عُشر ثانية دون أن يفقد ترابط الطور. في نسخة التجربة المُجراة على الأرض، يمكن أن يتحقق هذا بالاحتفاظ بالفوتون في تجويف من نوع معين، وفي النسخة المُجراة في الفضاء ينعكس الفوتون على مرآة شعاعية X-ray mirror توجد على منصة فضائية منفصلة، ربما تبعد عنه بمسافة تساوي قطر الكرة الأرضية. وفي الطرف الآخر لحالة تراكب الفوتون، يصطدم الفوتون ببلورة صغيرة — تحتوي مثلًا على نحو 10^{15} نواة — وينعكس من البلورة ناقلًا جزءًا كبيرًا من كمية التحرك الخاصة به إلى البلورة. وفي التجربة المُجراة على الأرض، فإن هذا الجزء من حالة الفوتون — المنعكس من البلورة — يُحتفظ به في تجويف مماثل (أو ربما التجويف نفسه) لتجويف الجزء الآخر لحالة الفوتون. وفي نسخة التجربة الفضائية، يُرسل الجزء

الثاني من حالة الفوتون أيضًا إلى المرآة الموجودة على المنصة الفضائية. بالتالي، تتمثل حالة البلورة في أن كمية التحرك جميعها الخاصة بتأثير الفوتون عليها تتوزع على كل نوى البلورة التي تعمل بمنزلة جسم جاسئ (كما يحدث في بلورة موسباور Mossbauer) دون وجود احتمال كبير لإثارة أنماط اهتزازية داخلية. بذلك تتأثر البلورة بأحد أنماط القوة المعيدة (restoring force) لقدرتها — المُشار إليها في الشكل بزنبرك — بحيث تعود لموضعها الأصلي في عُشر ثانية، وفي تلك اللحظة — في نسخة التجربة المُجراة على الأرض — يتحرر جزء حالة الفوتون الذي اصطدم بالبلورة من التجويف حتى يتمكن من عكس اتجاه مساره، لاغيًا سرعة البلورة العائدة وهي تفعل ذلك. أما الجزء الآخر من حالة الفوتون فإنه يتحرر أيضًا بعد ذلك، في توقيت بالغ الدقة، ويصل الجزآن معًا إلى مجزئ الحزمة الضوئية الأصلي. وفي نسخة التجربة الفضائية، تعكس المرآة الموجودة على المنصة الفضائية جزئي حالة الفوتون إلى الموضعين الذين جاءا منهما على المنصة الفضائية الرئيسية، وتصبح النتيجة متشابهة. وفي كل من نسختي التجربة — بشرط عدم وجود أي فقد في ترابط الطور في العملية بأكملها — يتحد جزءَا حالة الفوتون على نحو مترابط عند مجزئ الحزمة الضوئية ويخرجان بالطريقة نفسها التي دخلا بها، حتى لا يجد المكشاف الموجود عند الشعاع البديل الخارج من مجزئ الحزمة الضوئية ما يكشف عنه.

والآن، طبقًا للاقتراح الذي قدمته، فإن تراكب موضعين للبلورة، الذي يستمر قرابة عُشر ثانية في الخطوات السابقة، قد لا يكون مستقرًّا ويكون زمن الانحلال قريبًا من هذه الفترة. ويفترض هذا أن تكون الدالة الموجية للبلورة متمثلة في تركيز قيمة توقع توزيع الكتلة لمواضع النوى تركيزًا كبيرًا حول مواقعها النووية المتوسطة. وبالتالي طبقًا لهذا الاقتراح، قد توجد احتمالية كبيرة لأن يُختزل هذان الموضعان المتراكبان للبلورة (مثل قطة شرودنجر) تلقائيًّا بالفعل إلى موضع أو آخر. وفي البداية، تشابكت حالة الفوتون مع حالة البلورة، بحيث استلزم الاختزال التلقائي لحالة البلورة



شكل ١: (أ) التجربة المقترح إجراؤها على الأرض (ب) التجربة المقترح إجراؤها في الفضاء.

اختزالًا تلقائيًا لحالة الفوتون. وفي هذا الموقف، فإن الفوتون يكون قد «اتخذ طريقًا أو آخر» ولم يعد تراكبًا للحالتين، حتى أصبح ترابط الطور مفقودًا بين الشعاعين وأصبحت هناك احتمالية كبيرة (قابلة للحساب) لأن يجد المكشاف الفوتون.

مما لا شك فيه أنه في أية تجربة فعلية من هذا النوع، من المحتمل وجود أشكال عديدة أخرى لعدم الترابط يمكن أن تحل التداخل بين الشعاعين العائدين. والفكرة هنا — أنه بعد اختزال كل هذه الأشكال من عدم الترابط إلى حدٍّ ما كافٍ — أنه بتغيير البارامترات المتضمنة (حجم البلورة وطبيعتها الخاصة، والمسافة التي تُزاح طبقًا لها فيما يتعلق بأبعاد

الشبكة ... إلخ)، قد يكون من الممكن التعرف على الدليل المميز لزمن عدم الترابط المتضمن في نظام الاختزال الموضوعي الذي أسانده. وثمة تعديلات كثيرة لهذه التجربة المقترحة يجب وضعها في الاعتبار (في التجربة التي اقترحها لوسيان هاردي Lucien Hardy، استُخدم فوتونان وقد يكون لذلك بعض المميزات في نسخة التجربة المُجراة على الأرض متمثلة في أن الفوتونين الفرديين لا يكونان في حاجة إلى أن يُحتفظ بهما بصورة مترابطة لمدة عُشر ثانية). ويبدو لي أنه من المتوقع منطقيًّا — في المستقبل القريب — أن يُختبر ليس نظام الاختزال الموضوعي الذي أقترحه فقط، بل أيضًا الاقتراحات المتعددة الأخرى المتعلقة باختزال الحالة الكمي التي أُشير إليها في كتب كثيرة.

يمكن أن يكون لنتيجة هذه التجربة تأثيرات ذات أهمية لأسس ميكانيكا الكم، وقد يكون هناك تأثير كبير للغاية على استخدام ميكانيكا الكم في مجالات علمية عديدة، مثل البيولوجيا، حيث لا تكون ثمة حاجة إلى وجود تفرقة واضحة بين «المنظومة الكمية» و«الملاحِظ». وبصفةٍ أكثر خصوصية، تعتمد الاقتراحات التي قدمتها بالتعاون مع ستيورات هاميروف — والمتعلقة بالعمليات الفيزيائية والبيولوجية التي تحدث في المخ من أجل تسهيل فهم ظاهرة الوعي — بصورة حاسمة على وجود التأثيرات التي من المفترض أن تختبرها هذه التجارب ومداها، وقد تؤدي النتيجة السلبية المقنعة لهذه التجارب إلى استبعاد اقتراحاتنا.

Notes

(1) Ghirardi, G. C., Grassi, R., and Rimini, A. Continuous-spontaneous-reduction model involving gravity, *Physics Review*, **A42**, 1990, 1057-64.

(2) See Moroz, I., Penrose, R., and Tod, K. P. Spherically-symmetric solutions of the Schrödinger-Newton equations, *Classical and Quantum Gravity*, **15**, 1998, 2733-2742; Moroz, I., and Tod, K. P. An analytic approach to the Schrödinger-Newton equations, to appear in *Nonlinearity*, 1999.

(3) I am grateful to a number of colleagues for suggestions in relation to this. Most particularly, Johannes Dapprich suggested the idea that a small (Mössbauer-like) crystal might be the appropriate object to put into a linear superposition of two slightly differing locations. Considerable encouragement about feasibility issues. and specific suggestions about the appropriate scales for the experiment, were put to me by Anton Zeilinger and several members of his experimental group at the Institute of Experimental Physics at the University of Innsbruck. The space-based version of this experiment was the result of discussions with Anders Hansson. See Penrose, R., Quantum computation, entanglement and state reduction, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **356**, 1998, 1927-39, for a preliminary account of the ground-based version of the experiment.

مصادر الصور

The Emperor's New Mind, R. Penrose, 1989. Oxford: Oxford University Press. 1.6, 1.8, 1.11, 1.12, 1.13, 1.16(a), (b) and (c), 1.18, 1.19, 1.24, 1.25, 1.26, 1.28(a) and (b), 1.29, 1.30, 2.2, 2.5(a), 3.20.

Shadows of the Mind, R. Penrose, 1994. Oxford: Oxford University Press. 1.14, 2.3, 2.4, 2.5(b), 2.6, 2.7, 2.19, 2.20, 3.7, 3.8, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.16, 3.17, 3.18.

High Energy Astrophysics, Volume 2, M.S. Longair, 1994. Cambridge: Cambridge University Press. 1.15, 1.22.

Courtesy of Cordon Art-Baarn-Holland © 1989. 1.17, 1.19.

رقم إيداع ٢٠٠٩/٣٥٧٧
ISBN 978 977 6263 24 6

لمحة عن المترجم:

عنان علي الشهاوي

عمل عنان علي الشهاوي بالترجمة منذ تخرجه في سنة ١٩٤٨ بجانب عمله صحفيًّا بجريدة العالم اليوم. ترجم العديد من الكتب منها «الأصول الاجتماعية والثقافية لحركة عرابي في مصر»، «معجم تاريخ مصر من الفتح العربي حتى نهاية عهد السادات»، وقد ساعده تخصصه في الفيزياء على ترجمة كثير من الكتب المتخصصة، منها «التعالق أكبر لغز في الفيزياء»، «النظرية الشاملة».

هذا الكتاب:

«يشتمل الكتاب على شرح وافٍ قدمه عالم من الطراز الأول وقد حذا فيه حذو العلماء أمثاله؛ حيث التوصل إلى الاستنتاجات استنادًا إلى الحدس واقتراحها على الآخرين للتصديق عليها أو تفنيدها أو تنقيحها.»

كيث ديفلين Keith Devlin (عالِم جديد)

«نادرًا ما يجول بخاطرنا أن نجد بين أيدينا دليلًا إرشاديًّا أكثر من رائع يعرض لأبعاد الفيزياء.»

عالِم أمريكي

في هذا السفر النفيس، نُوقشت آراء روجر بنروز المثيرة للجدل والمتعلقة بفيزياء الكون واسعة النطاق وعالم فيزياء الكم ضيق النطاق، إلى جانب فيزياء العقل البشري، مناقشة شاملة. ويُعد هذا الكتاب – في الواقع – ملخصًا رائعًا لأفكار بنروز حول هذه الموضوعات الخاصة بالفيزياء التي يشعر أنها مشكلات كبرى لم يُتوصل بعد إلى حلول لها. والكتاب أيضًا يمكن اعتباره مقدمة نموذجية إلى المفاهيم الجديدة جذريًّا التي يعتقد أنها ستؤتي ثمارها مستقبلًا فيما يتعلق بفهم وظائف المخ وطبيعة العقل البشري.

http://www.kalematarabia.com

٢٣٢ صفحة

ISBN 978-977-6263-24-6

9 789776 263246

كلمات عربية

كلمة
KALIMA

المعارف العامة
الفلسفة وعلم النفس
الديانات
العلوم الاجتماعية
اللغات
العلوم الطبيعية والدقيقة / التطبيقية
الفنون والألعاب الرياضية
الأدب
التاريخ والجغرافيا وكتب السيرة